



# Contribution à la modélisation des données spatio-temporelles

Ali Frihida

## ► To cite this version:

Ali Frihida. Contribution à la modélisation des données spatio-temporelles. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (Université de Tunis El Manar), 2015. tel-01388991

**HAL Id: tel-01388991**

**<https://hal.science/tel-01388991>**

Submitted on 27 Oct 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université de Tunis El Manar



المدرسة الوطنية للمهندسين بتونس

école nationale d'ingénieurs de Tunis

Rapport de Synthèse des Travaux de Recherche  
présenté en vue de l'obtention de  
l'Habilitation Universitaire à la Recherche en Génie Électrique

# Contribution à la modélisation des données spatio-temporelles

Docteur Ali Frihida

Soutenu mardi le 02 Juin 2015

Jury d'examen:

Professeur Hamid Amiri	<i>Président</i>
Professeur émérite Thérèse Libourel	<i>Examineur</i>
Professeur Kamel Barkaoui	<i>Examineur</i>
Professeur émérite Nouredine Ellouze	<i>Membre</i>
Professeur Christophe Claramunt	<i>Membre</i>

# Table des Matières

Dédicace	3
Liste des Illustrations	5
Liste des Tableaux	8
Préface	9
Introduction	11
<b>1 SGBD spatio-temporels et types de données abstraits spatio-temporels.</b>	<b>13</b>
1.1 Modélisation de bases de données spatio-temporelles. . . . .	14
1.2 Extraction de <i>TST</i> par <i>Knowledge Discovery in Databases, KDD</i> . . . . .	21
1.3 Type Abstrait de Données Spatio-Temporel <i>TADST</i> . . . . .	24
1.4 Conclusion . . . . .	36
<b>2 Gestion des données de réseaux de capteurs sans fils.</b>	<b>38</b>
2.1 RCSF et WoT. . . . .	39
2.2 Traitement de requêtes sous RCSF. . . . .	41
2.3 Un nouveau <i>SNQP</i> sur RCSF RPL/6lowpan. . . . .	46
2.4 DSMS hybride spatio-temporel. . . . .	48
2.5 Conclusion . . . . .	66
<b>3 Modélisation 3D des données géographiques</b>	<b>67</b>
3.1 Outils de modélisations 3D . . . . .	68
3.2 Modélisation de la Médina . . . . .	74
3.3 Application Médina 3D . . . . .	75
3.4 Conclusion . . . . .	78
<b>4 Plateforme WebSIG pour la résolution des conflits.</b>	<b>79</b>
4.1 Les outils Web 2.0. . . . .	80
4.2 La technologie WebSIG. . . . .	81
4.3 Gestion de conflits. . . . .	85
4.4 Application WebSIG développée . . . . .	89
4.5 Conclusion . . . . .	93

<b>5</b>	<b>Ontologie des connaissances ancestrales en irrigation.</b>	<b>94</b>
5.1	Introduction. . . . .	94
5.2	Modélisation des connaissances ancestrales . . . . .	95
5.3	Web 2.0 et outils participatifs . . . . .	97
5.4	Web sémantique et modélisation des connaissances . . . . .	98
5.5	Documentation et cueillette du savoir ancestral . . . . .	102
5.6	Modélisation des aménagements hydrauliques d'irrigation par OWL . . . . .	107
5.7	Interrogation de l'ontologie Irrigation . . . . .	110
5.8	Conclusion . . . . .	113
<b>6</b>	<b>Contribution à la modélisation spatio-temporelle: Conclusion et Perspectives</b>	<b>115</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>118</b>



# Dédicace

Je dédie ce rapport à tous ceux qui m'ont aidé à embellir ma carrière d'enseignant-chercheur directement ou indirectement. Je cite:

- Mon feu père ElHajj Abdallah
- Mon épouse Rim,
- mes enfants:
  - Mohamed-Hédi
  - Mohamed-Yassin
  - Mohamed-Taha
  - Mohamed-Habib
- Ma mère Hesna
- La loyale baby-sitter Hesna

J'espère sincèrement avoir comblé leurs attentes et je leur promets de continuer sans relâche.

# Remerciements

Je tiens à remercier tous ceux, désormais ami(e)s proches, du domaine de l'enseignement et de la recherche pour leur soutien, leur encouragement et leurs conseils sans quoi je ne saurais rédiger ce document:

- Mon mentor Christophe Claramunt, Directeur de l'*Institut de Recherche de l'École Navale, IRENav*, Brest, France.
- Noureddine Ellouze, Ex-directeur du laboratoire de recherche *Signal, Image et Technologie de l'Information* de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis.
- Hamid Amiri, Directeur du laboratoire de recherche *Signal, Image et Technologie de l'Information* de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis.
- Thérèse Libourel, Professeur émérite de l'Université Montpellier, France
- Kamel Barkaoui, Professeur au *Conservatoire National des Arts et Métiers*, France.
- Mes professeurs tunisiens, canadiens et américains.
- Mes collègues de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis et de l'enseignement supérieur.
- Mes étudiants ingénieurs, en Master et Ph. d. (soutenus ou en cours).
- Et d'autres encore qui se reconnaîtront.

# Liste des Illustrations

1	Carte conceptuelle de l'activité de recherche. . . . .	12
1.1	Illustration du concept Time Geography. [34] . . . . .	14
1.2	Diagramme de classes (spatio-temporel).[60] . . . . .	16
1.3	Schéma d'itinéraire (a) Chaîne d'activités $A$ (b) Chaînes de déplacements (Move) $M$ . (c) Intercalage sur itinéraire Temporel $P$ . . . . .	18
1.4	Exemples d'opérateurs [63]. . . . .	18
1.5	Prédicats Temporels d'Allen.[8] . . . . .	19
1.6	Requêtes et Résultats [63]. . . . .	20
1.7	Affichage des trajectoires spatio-temporelles [63]. . . . .	20
1.8	Matrice d'allocation de style. . . . .	22
1.9	Interface d'extraction de $TST$ . . . . .	23
1.10	Affichage d'itinéraire. . . . .	24
1.11	Résultats de la Requête 1 . . . . .	34
1.12	Résultats de la Requête 2 . . . . .	35
1.13	Résultats tabulaires de la Requête 3 . . . . .	36
2.1	Architecture EWSL.[52] . . . . .	40
2.2	Affichage de la température sur Cosm.com (Xively.com).[52] . . . . .	41
2.3	Schéma d'un SNQP [50]. . . . .	44
2.4	Architecture de Qlowpan.[51] . . . . .	47
2.5	Simulation Qlowpan sur Cooja de Contiki.[51] . . . . .	48
2.6	Diagramme de classe de l'ontologie SNAP/SPAN du RCSF . . . . .	52
2.7	Modèle logique RCSF . . . . .	53
2.8	Chaine d'observations . . . . .	54
2.9	Architecture du DSMS spatio-temporel . . . . .	56
2.10	TinyDB: Sauvegarde des observations par requêtes . . . . .	57
2.11	Localisation des notes . . . . .	58
2.12	Nord de la Tunisie. . . . .	58
2.13	Motes déployées dans un champ agricole. . . . .	58
2.14	Requête Spatiale 1 . . . . .	59
2.15	Requête Spatiale 2. . . . .	60
2.16	Requête Temporelle 1. . . . .	61
2.17	Requête Temporelle 2. . . . .	62
2.18	Requête Temporelle 3. . . . .	63

2.19	Requête Spatio-Temporelle 1. . . . .	64
2.20	Requête Spatio-Temporelle 2. . . . .	65
2.21	Requête Spatio-Temporelle 3. . . . .	66
3.1	Modélisation 3D avec CityGML[120]. . . . .	71
3.2	Les différents LOD d'un bâtiment CityGML. . . . .	71
3.3	La comparaison entre des standards de représentation urbaine 3D.[120] . . . . .	72
3.4	Berlin Pariser Platz visualisée par LandXplorer. . . . .	73
3.5	Berlin Pariser Platz visualisée avec Aristoteles. . . . .	73
3.6	Scène visualisée par 3DGIS Cityvu. . . . .	74
3.7	Les cartes bidimensionnelles (à gauche la carte non géo référencée et à droite la carte géo référencée.) . . . . .	75
3.8	Processus de création d'un modèle CityGML 3D. . . . .	75
3.9	Modification des bâtiments dans Google SketchUp. . . . .	76
3.10	Quelques monuments de la Médina en 3D sous <i>gvSIG</i> . . . . .	76
3.11	La base de données du modèle CityGML. . . . .	77
3.12	Interrogation spatiale. . . . .	77
3.13	Interrogation temporelle. . . . .	78
4.1	Quelques usages communs du Web 2.0 [102]. . . . .	81
4.2	Rôle de la bibliothèques OpenLayers [102]. . . . .	84
4.3	Schéman d'évolution d'un conflit [102]. . . . .	86
4.4	Page d'accueil de la plateforme WebSIG [102]. . . . .	89
4.5	Sélection de localisation par pointeur [102]. . . . .	90
4.6	Traçage des lignes [102]. . . . .	91
4.7	Traçage de polygone [102]. . . . .	92
5.1	Langages du Web Semantique [17] . . . . .	100
5.2	Plateformes du Web Collaboratif[195]. . . . .	103
5.3	L'architecture de la plateforme [195]. . . . .	104
5.4	Menu principal de la plateforme collaborative[195]. . . . .	105
5.5	Commentaire sur contenu[195] . . . . .	105
5.6	Tagging d'un contenu[195]. . . . .	106
5.7	Schéma du modèle de partage d'eau d'Ibn Chabbat[143]. . . . .	107
5.8	Liste partielle des concepts (classes) identifiés de l'ontologie [195]. . . . .	108
5.9	Hiérarchie des concepts de l'ontologie [195]. . . . .	108
5.10	Architecture de SPARQL[195]. . . . .	109
5.11	Interface EndPoint de SPARQL [195]. . . . .	110
5.12	Requête sur les classes de l'ontologie. . . . .	111
5.13	Résultat tabulaire de la requête des classes. . . . .	111
5.14	Requête du débit des segua. . . . .	112
5.15	Résultat de la requête du débit des segua. . . . .	112
5.16	Requête de fréquence d'irrigation. . . . .	113

5.17	Résultat de la requête de fréquence d'irrigation. . . . .	113
------	---	-----

# Liste des Tableaux

2.1	Time Instant Predicates . . . . .	54
2.2	Liste élémentaire des opérateurs de instants temporels de l'OM et de la chaine OM .	55
2.3	Opérateurs spatiaux de OM . . . . .	55
2.4	Opérateurs statistiques . . . . .	56

# Préface

Cette préface se penche sur les approches utilisées pour conduire les recherches citées dans le rapport. Les recherches des trois axes de la première thématique de modélisation des données spatio-temporelles furent pilotées selon l'approche classique. Pour la seconde thématique et pour asseoir les projets de développement d'application au niveau Master sur une base épistémologique solide, j'ai fait appel à une approche de recherche qui émerge [108] au sein de la communauté des chercheurs en *systèmes d'information*, *SI*. L'approche est dite *Action-Research*, *Recherche-Action*, *AR/RA*.

Selon les études effectuées entre autres par [132, 90, 69], l'approche RA se positionne (via le paradigme interprétatif[108, 57]) comme une approche *challenger* vouée à un excellent avenir. La RA garde les mêmes idéaux d'objectivité des résultats et de production des connaissances que l'approche classique sauf qu'elle semble plus appropriée aux projets qui impliquent lourdement les sujets/clients. Le plus distinctif est qu'elle donne aux sujets/clients le statut de chercheurs en les faisant participer au processus de collecte de données, de formulation d'hypothèses, de conception, et d'implantation de prototypes et d'interprétation des résultats. L'argument majeur invoqué pour expliquer l'élimination de la distanciation entre chercheur et sujet/client est que la recherche doit être directement ancrée dans le contexte et les intérêts des concernés et non filtrée/confisquée par la perception du chercheur/expert. Introduite en 1985 dans le domaine des SI, elle permet de joindre les buts de résolution de problèmes informatiques à ceux de la contribution à la science, de favoriser une collaboration intense entre les participants augmentant ainsi leurs compétences et leur implication [185, 182, 138, 86].

L'approche RA est conçue pour l'implémentation du changement. Participative, elle prône l'investigation collaborative par des équipes de chercheurs, praticiens, experts et sujets/clients. La connaissance scientifique est ainsi produite collectivement. Plus précisément, la RA est le processus de collecte systématique de données pour réaliser les objectifs, buts ou besoins d'un système sous étude. Couplées à des hypothèses, des solutions ou des prototypes, les données recueillies sont re-injectées dans le système observé pour des fins de changement. Une évaluation des résultats obtenus permettent d'initier une nouvelle itération de collecte de données, de raffinement des solutions et de re-injection dans le système. Les connaissances générées concernent à la fois le nature du système où la recherche fut conduite et les procédures qu'il faut respecter pour y opérer des changements [5].

En pratique, cette approche génère principalement deux questions:

1. Une question avec deux volets: un volet de recherche descriptive qui examine la nature et l'étendue du problème puis un volet de conception/développement qui étudie/propose/implémente une solution (prototype) pour répondre aux besoins.
2. Une question relative à un objectif *principiel* de généralisation/portabilité des résultats et des procédures de résolution pour des applications futures.

La recherche en développement d'applications correspond aux deux volets de la première question. Si elle s'arrête à ce stade, elle ne peut prétendre avoir contribué au savoir. C'est dans la réponse à la seconde question que le projet de développement acquiert le statut d'une recherche scientifique.

Plus précisément, l'approche se base sur un processus systématique itératif d'analyse, conception, développement, implémentation et évaluation qui sera à l'origine d'un nouveau développement. En plus de l'échange continu entre chercheurs, praticiens et sujets/clients par souci de pragmatisme, le prototypage incrémental en est l'outil de choix qui permet d'améliorer la qualité du produit. L'approche définit aussi des *outcomes* ou "résultats" immédiats et d'autres lointains qui concernent l'optimisation et la généralisation des procédures de développement. Les connaissances sont extraites déductivement par l'évaluation des prototypes développés.

La RA est donc appropriée aux projets de développement en ingénierie soft ou hard, à ceux orientés conception et implantation des applications *e-learning*, *Interfaçage Personne Machine* ou les applications Web dont l'objectif est d'encourager la participation des internautes et d'enrichir le contenu par lequel ils collaborent.

En conclusion, les recherches que j'ai encadrées ne sont pas toutes conduites selon le schéma classique de la recherche en informatique et qui estime que la qualité d'une recherche dépend essentiellement de la liste des hypothèses qu'elle construit suite à une revue de littérature et par la contribution au corps de connaissances du domaine. La recherche en SI incluant les sous domaines e.g. le génie logiciel, les BD, Interfaces Personne Machine, le SIG, les applications Web, les applications embarquées, le design des micro-processeurs etc...fait appel à d'autres sciences connexes ce qui limite l'efficacité de l'approche classique. L'approche AR fut adoptée comme cadre méthodologique pour:

1. Le développement d'une application portant sur le *Web 2.0* et ses outils collaboratifs avec une recherche sur la modélisation ontologique du savoir ancestrale et son intégration dans le Web sémantique et
2. Le développement d'une application *WebSIG* comme plateforme de résolution des conflits d'aménagement urbain.

Dans le cas des deux applications, il fallait une participation active des sujets/citoyens dans la collecte des données, le design des solutions et le prototypage. Avec l'évaluation de la qualité de services offerts par les prototypes et les connaissances acquises par les participants, les recherches transcendent le simple développement d'applications informatiques pour générer un savoir scientifique à la fois technique et social.



# Introduction.

En dépit du titre du rapport, mes recherches ne se sont pas limitées uniquement à la problématique de la modélisation des données spatio-temporelles. Avec l'aide des membres de l'équipe *Cognition and Ontology of GeoSpatial Systems*, CONTOS<sup>2</sup>, mes activités de recherche ont couvert en fait trois axes:

1. La modélisation de données spatio-temporelles comme domaine principal sur deux thématiques:
  - (a) Une thématique qui continue les travaux entamées au laboratoire de Génie Géomatique de l'Université de Montréal et qui visait la modélisation des phénomènes naturels et humains, la conception et l'implantation de types abstraits de données spatio-temporels dans le cadre du *Time Geography*.
  - (b) Une autre thématique touche à la modélisation des données 3D Géographiques par *CityGML* tout en révélant le temps comme dimension cachée du contenu.
2. Réseaux de capteurs sans fil *RCSF*, Web of Things, SNPQ et DSMS
3. Les outils collaboratifs du *Web 2.0*, WebSIG, le *Web sémantique* et les ontologies avec:
  - (a) Une recherche sur l'utilisation du *WebSIG* comme plateforme de résolution des conflits d'aménagement territorial
  - (b) Une recherche sur la modélisation ontologique du savoir ancestrale et son intégration dans le Web sémantique

Les domaines touchés sont représentés par la carte conceptuelle montrée par la figure 1 de la page suivante.

Dans les chapitres suivants, je présente succinctement les recherches de chaque axe selon l'ordre ci-dessus cité. Je finirai par une conclusion globale qui évalue l'effort déployé tout en esquissant les perspectives futures qui devraient être plus riches en termes de production scientifique.

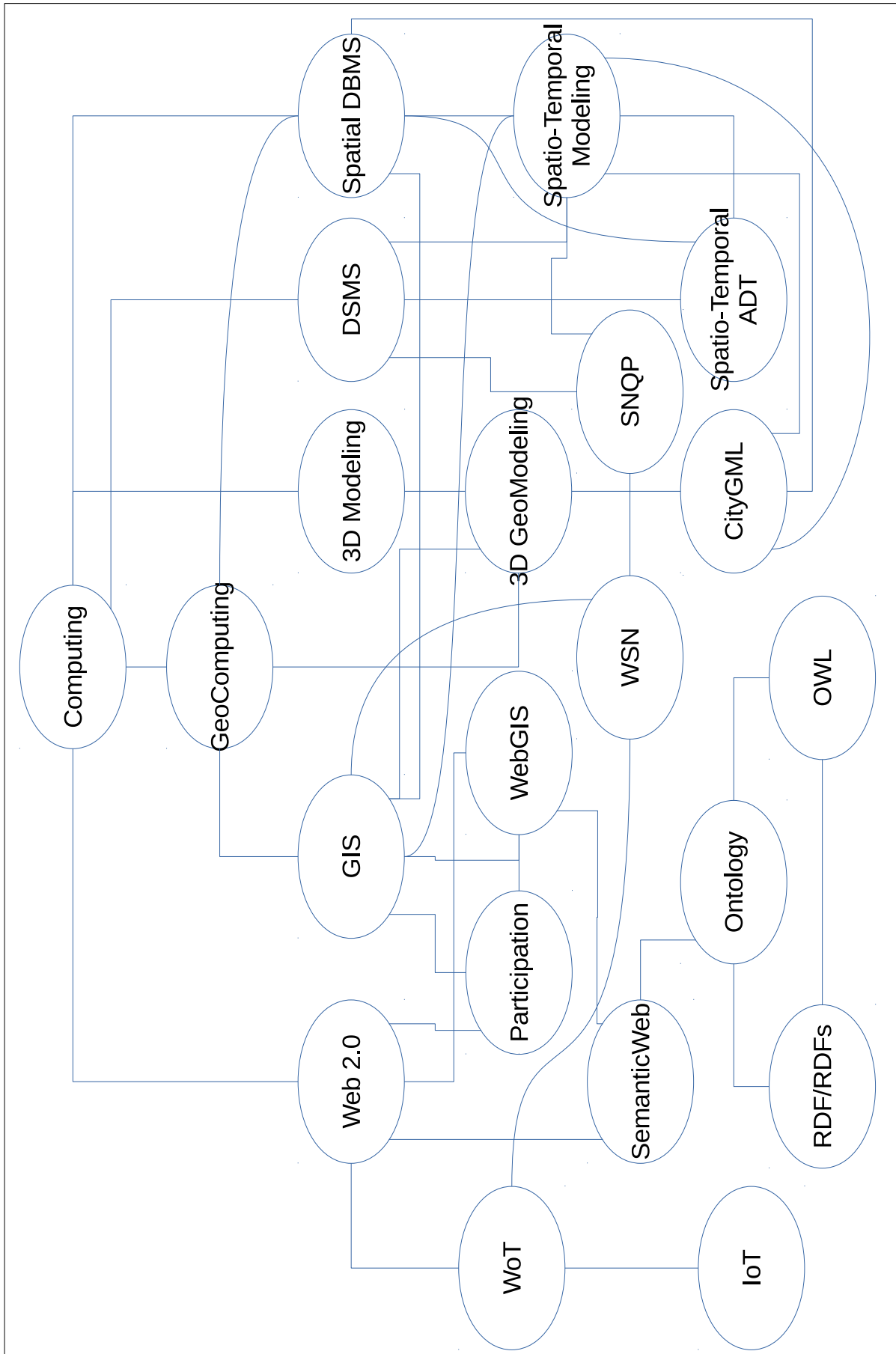


Figure 1: Carte conceptuelle de l'activité de recherche.

# Chapitre 1

## SGBD spatio-temporels et types de données abstraits spatio-temporels.

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Modélisation de bases de données spatio-temporelles. . . . .</b>	<b>14</b>
1.1.1	Modèle de données spatio-temporel. . . . .	15
1.1.2	Modélisation de la trajectoire spatio-temporelle. . . . .	16
1.1.3	Implémentation de la BD spatio-temporelle. . . . .	19
1.1.4	Conclusion . . . . .	20
<b>1.2</b>	<b>Extraction de <i>TST</i> par <i>Knowledge Discovery in Databases, KDD</i> . . .</b>	<b>21</b>
<b>1.3</b>	<b>Type Abstrait de Données Spatio-Temporel <i>TADST</i>. . . . .</b>	<b>24</b>
1.3.1	Implémentation du type abstrait de données <i>TADST</i> . . . . .	25
1.3.2	Test du type abstrait de données <i>TADST</i> . . . . .	33
<b>1.4</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>36</b>

---

### Introduction.

Les objets mobiles inscrivent dans l'espace et sur l'axe temporel des trajectoires conceptuelles qui rappellent leurs itinéraires. Représenter ces trajectoires dans les SGBD constitue un défi de taille vu la complexité du phénomène et l'obligation de considérer ses dimensions spatiales, temporelles et sémantiques. À ce titre, la modélisation *spatio-temporelle* des trajectoires se donne comme but de concevoir des solutions performantes pour une analyse et par ricochet une exploitation optimale des données disponibles sur les itinéraires des entités en mouvement. L'analyse systémique des données sur la mobilité permet de dégager la nature du *comportement dynamique*, d'expliquer les *patterns* des déplacements et de tester des scénarii futurs.

C'est dans le génie géographique qu'est apparu le *Time Geography* comme cadre conceptuel qui définit la mobilité dans l'espace et dans le temps [84]. Le cadre avance que dans l'espace-temps, un individu décrit un itinéraire *Time Path* depuis sa naissance jusqu'à son décès. L'itinéraire de la vie

est composé par des sous-itinéraires découpés selon des unités temporelles e.g. heure, jour, semaine, etc. Le séquençement des itinéraires se fait en respect à des contraintes de capacité (besoins de sommeil, d'alimentation, de moyens de transport), à des contraintes de couplage (où, quand et pour combien de temps, rencontres sociales, outils ou matériel pour la production, la consommation et l'échange) et des contraintes d'autorité (les entités ou les événements sont sous le contrôle d'un individu, d'un groupe ou d'un règlement).

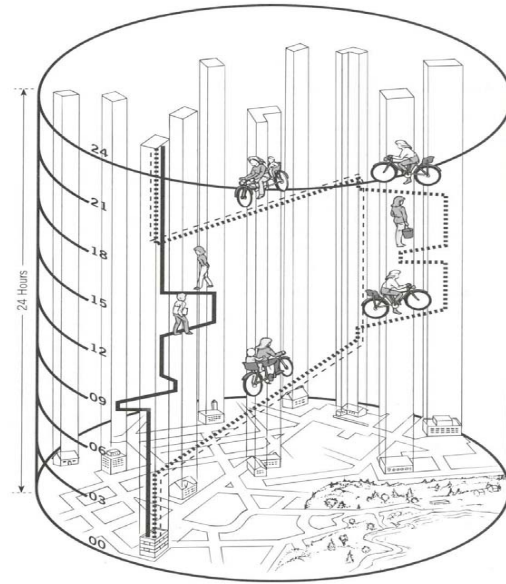


Figure 1.1: Illustration du concept Time Geography. [34]

Le *Time Geography* est enrichi par des notions dont le *cube* (ou cylindre) *spatio-temporel* qui est une représentation tri-dimensionnelle (figure 1.1 où peut s'inscrire l'itinéraire sur un plan 2D associé à un axe temporel), le *prisme spatio-temporal* qui délimite l'extension spatiale que peut atteindre un individu selon le *budget temporel* dont il dispose et finalement les *paquets d'itinéraires* qui réfèrent à des agrégats d'itinéraires sur la base de contraintes communes[60].

La puissance expressive du *Time Geography* est évidente. Plusieurs recherches ont pris en charge d'intégrer ses concepts dans des applications entre autres:

- de transport [111, 128, 127, 139, 187] et
- dans la visualisation des itinéraires spatio-temporels [110]

Dans mes activités de recherche dans le cadre de mon doctorat, j'ai visé à opérationnaliser les concepts avancés par *Time Geography* en se servant du *Système d'Information Géographique, SIG* et des SGBD comme plateforme et coquille d'hébergement et d'expérimentation.

## 1.1 Modélisation de bases de données spatio-temporelles.

Le contenu de cette section provient de l'article:

Ali Frihida, Danielle J. Marceau, Marius Thériault, **Development of a Temporal Extension to Query Travel Behavior Time Paths Using an Object-Oriented GIS.** *GeoInformatica* 8(3): 211-235 (2004).

**GeoInformatica** est une revue indexée par **ISI Thompson Reuters** au site <http://ip-science.thomsonreuters.com/>.

À titre de rappel, ma recherche de doctorat, qui fut financée par du *Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et Génie, CRSNG*) et par le *Réseau canadien de Centre d'excellence en géomatique, GEOIDE*, se pose comme problématique l'exploitation des données sur la mobilité pour dégager les caractéristiques du comportement de transport des individus sondés par une enquête Origine-Destination de transport urbain.

La solution choisie fut d'exploiter les concepts du *Time Geography* afin de récupérer les itinéraires des individus et des ménages, de les intégrer dans une base géographique en vue d'analyses spatiales et d'affichage sur interface cartographique. La récupération et la construction visuelle des trajectoires devrait se faire suite à l'interrogation des données de l'enquête.

### 1.1.1 Modèle de données spatio-temporel.

La base de données que fut utilisée est une *enquête Origine-Destination, O-D* conduite en 2001 par la *Société de Transport de la Communauté Urbaine de Québec, STCUQ* de la région de Québec, Canada. Une enquête O-D permet d'esquisser un tableau du comportement de transport de la population d'une région. Spécifiquement, l'enquête a pour objectif de rendre compte des déplacements et activités au cours d'une journée de chacun des membres d'un échantillon des ménages. Les résultats sont encodés dans une table. Les réponses de chaque individu qui a participé à l'enquête apparaissent dans une ligne unique de cette table.

En plus des données encodées dans la table, la recherche dispose de:

1. de la carte administrative des municipalités de la région de Québec. Le Centre Ville de Québec est représenté par la municipalité de Charlesbourg et
2. d'un réseau routier de la région de Québec.

J'ai commencé par le design d'un modèle de données spatio-temporel comme le montre la figure 1.2.

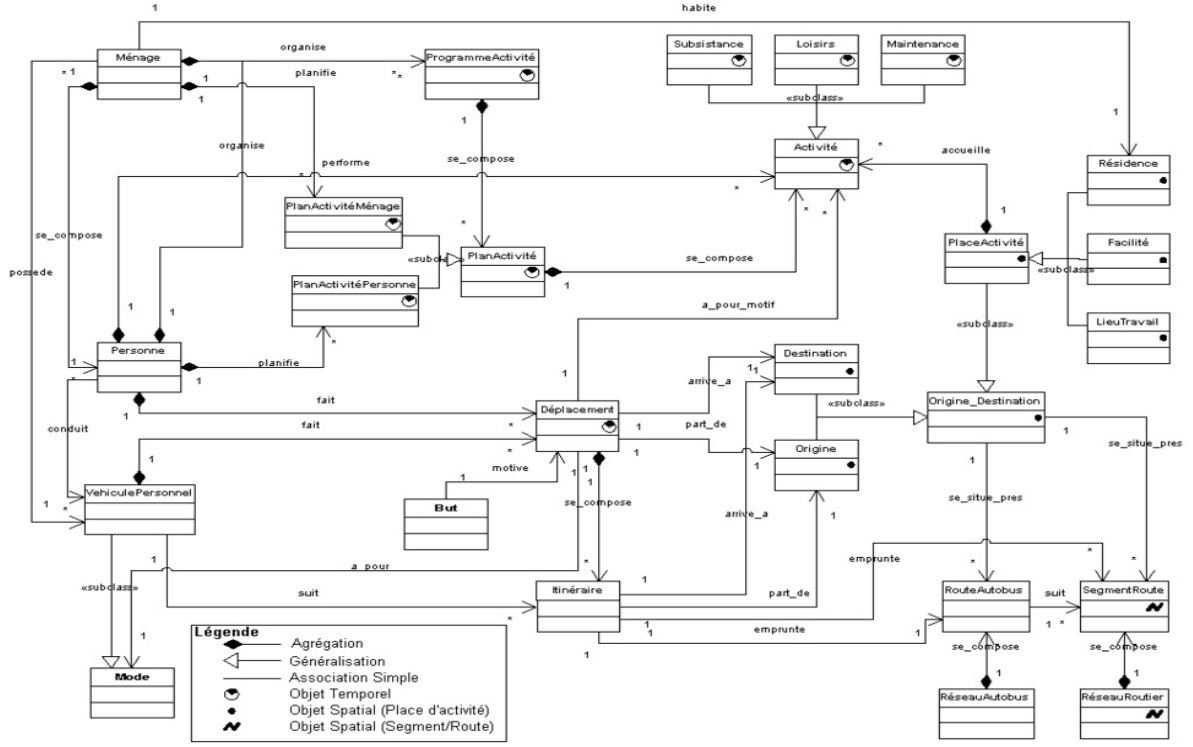


Figure 1.2: Diagramme de classes (spatio-temporel).[60]

Orienté-objets, le modèle offre la possibilité d'encapsuler les attributs caractéristiques d'un individu (*Personne* ou *Person*) avec un focus sur l'itinéraire qu'il a effectué.

Comme les données brutes de l'enquête O-D sont encodées dans une seule table, il a fallu procéder par *re-engineering* pour fragmenter la table en autant de tables que suggère le diagramme de la figure 1.2.

Avant cette recherche, *Time Geography* était un cadre théorique qualitatif qui peut être validé sur le plan quantitatif. Cette recherche fut la première à proposer un formalisme mathématique de l'itinéraire pour le préciser et pour évacuer les possibles ambiguïtés provenant de la formulation qualitative et/ou linguistique.

### 1.1.2 Modélisation de la trajectoire spatio-temporelle.

Ainsi et à l'aide de la théorie ensembliste, l'itinéraire fut considéré comme un ensemble d'évènements à ordre total sous forme d'un enchainement alternatif de déplacements et d'activités. Les équations suivantes explicitent le développement.

$T^2$  est le produit cartésien de tous les instants temporels de la trajectoire.

**Définition 1.**

$$T * T = T^2 \quad (1.1)$$

Un évènement est un objet temporel (activité ou déplacement) qui a un instant ( $t_s$ ) de commencement et un instant de fin ( $t_e$ ) où  $t_s$  et  $t_e$  sont isomorphes aux nombres réels ( $t_s > 0$  et  $t_e > 0$ ).

Un évènement  $E$  est composé par un couple  $(t_s, t_e)$ . Par conséquent,

**Définition 2.**

$$E = \{\forall t_s, t_e \in T^2 | t_s < t_e\} \quad (1.2)$$

Ceci délimite les bornes temporels d'un évènement et la contrainte sur le temps de commencement et celui de la fin.

**Définition 3.**

$$\bigcup_{i=1}^n E_i \subseteq T^2 \quad (1.3)$$

signifiant la fermeture de l'ensemble de tous les événements inclus dans l'enquête.

**Définition 4.**

$$A \subset \bigcup_{i=1}^n E_i \subseteq T^2 \quad (1.4)$$

A est l'ensemble des évènements de classe Activity (Activité).

**Définition 5.**

$$M \subset \bigcup_{i=1}^n E_i \subseteq T^2 \quad (1.5)$$

M est l'ensemble des événements de classe Move (Déplacement).

**Définition 6.**

$$A \cup M = \bigcup_{i=1}^n E_i \quad (1.6)$$

$A_i$  étant l'ensemble des activités de l'individu  $i$  et  $M_i$  étant l'ensemble des déplacements de l'individu  $i$ ;  $A_i$  et  $M_i$  sont des ensembles totalement ordonnés, non-réflexifs, non-symétriques et transitifs. Aussi, on considère que:

**Définition 7.**

$$A_i \cap M_i = \emptyset \quad (1.7)$$

Ce qui stipule qu'il n'y a pas deux évènements de la même chaîne qui ont le même temps de commencement et un temps de fin.

A partir de (6) et de (7), il est possible de définir l'itinéraire temporel de l'individu  $i$ :

**Définition 8.**

$$A_i \cap M_i = P_i \subset \bigcup_{i=1}^n E_i \quad (1.8)$$

où  $P_i$  est l'itinéraire temporel de l'individu  $i$ .

L'itinéraire temporel est une séquence d'activités et de déplacements réalisés et enregistrés par un individu. Avec un temps de début et un autre de fin.  $P_i$  dénote un enchainement où les activités et les déplacements sont temporellement intercalés comme dans la figure 1.3.  $P_i$  est un ensemble totalement ordonné, non réflexif, non-symétrique et transitif.

**Définition 9.**

$$\bigcup_{i=1}^n P_i = \bigcup_{i=1}^n E_i \subseteq T^2 \quad (1.9)$$

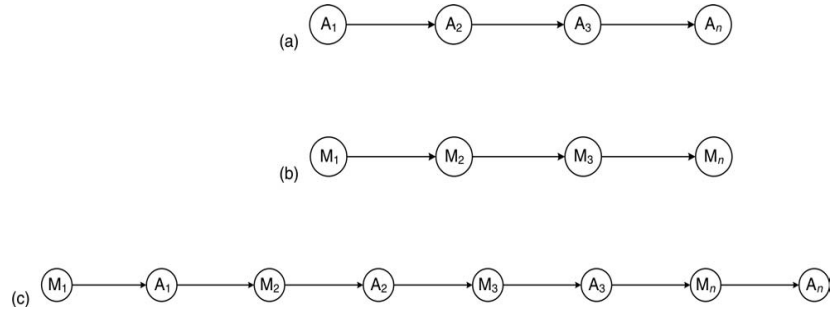


Figure 1.3: Schéma d'itinéraire (a) Chaîne d'activités  $A$  (b) Chaînes de déplacements (Move)  $M$ . (c) Intercalage sur itinéraire Temporel  $P$

Cela signifie la fermeture des itinéraires temporels des individus impliqués dans l'enquête.

Chaque itinéraire et chacun de ses déplacements et activités sont considérés comme des entités interrogeables individuellement. Le but étant de permettre une exploitation de fine granularité des données en mettant à la disposition de l'analyste la possibilité d'interroger l'itinéraire dans son ensemble mais aussi chacune de ses composantes [60].

L'itinéraire et ses composantes sont dotés des propriétés spatiales et temporelles. Ainsi, l'itinéraire comme entité d'agrégation retrace le chemin suivi, son lieu de départ et son lieu de terminaison et peut renseigner sur sa durée temporelle calculée comme la différence entre le temps du début et celui de la fin. Les déplacements inclus dans l'itinéraire sont renseignés quand à leur localisation (point) de départ, leur début temporel, leur localisation (point) d'arrivée, leur fin temporelle et leur durée. Les activités incluses dans l'itinéraire sont renseignées quand à leur localisation (point), leur début temporel, leur fin temporelle et leur durée.

Par la suite, ce fut l'introduction de la signature puis de la sémantique d'un ensemble d'opérations qui devraient servir à interroger spatialement et temporellement les objets de la BD e.g. *Person*, *Trip*, *Activity*. La figure 1.4 affiche certains des opérateurs associés aux objets.

Operator	Method signature	Proprietary Object	Result
$\sim$	Activity_list()	Person	Time ordered activity collection
$\sim$	Trip_list()	Person	Time ordered trip collection
$\alpha$	First()	Activity	First activity
$\omega$	Last()	Activity	Last activity
$\alpha$	First()	Trip	First trip
$\omega$	Last()	Trip	Last trip
$\eta$	Next(target)	Trip	Next trip at target
$\eta$	Next(target)	Activity	Next activity at target
$\pi$	Previous(target)	Trip	Previous trip at target
$\pi$	Previous(target)	Activity	Previous activity at target
$\chi$	Activity(position)	Person	Position specified trip
$\chi$	Trip(position)	Person	Position specified activity
$\Sigma$	Activities_count()	Person	Total of activities
$\Sigma$	Trips_count()	Person	Total of trips

Figure 1.4: Exemples d'opérateurs [63].

Ainsi défini, l'itinéraire est dit *Trajectoire Spatio-Temporelle*, *TST*.



### 1.1.3 Implémentation de la BD spatio-temporelle.

Pour l'implémentation du modèle de données spatio-temporel, les protocoles standards pour le développement de BD temporelles sont définis:

1. Identification des structures temporelles significatives de l'application
2. Incorporation de ces structures dans le schéma de la BD
3. Implantation des prédicats d'Allen comme opérations composant le requêteur temporel (approche minimaliste)

L'application des protocoles 1 et 2 permettent de transformer le schéma de la BD de statique en temporel et ce en ajoutant des attributs temporels à tout objet qui possède une dimension temporelle. Ainsi les attributs temporels (*Start – Time*, *End – Time*, *Duration*) et spatiaux (*From – Location*, *To – Location*) sont ajoutés aux objets de la base comme *Trip* et *Activity*. Ces attributs vont servir au calcul spatial et temporel qui va être effectué lors de l'interrogation de la BD. Étant implicites dans les données brutes de l'enquête, les attributs *Start – Time*, *End – Time*, *Duration* doivent être estimés. Un script fut codé afin d'automatiser cette procédure et alimenter les tables par les valeurs calculées[63].

Le troisième protocole consiste à l'implantation des prédicats temporels d'Allen [8, 9] affichés par la figure 1.5 par des méthodes qui feront partie de l'interface des objets.

<i>Representation</i>	<i>Predicates</i>
$[p_1, p_2]$ equals $[q_1, q_2]$	$p_1 = q_1$ and $p_2 = q_2$
$[p_1, p_2]$ before $[q_1, q_2]$	$p_2 < q_1$
$[p_1, p_2]$ meets $[q_1, q_2]$	$p_2 = q_1$
$[p_1, p_2]$ overlaps $[q_1, q_2]$	$p_1 < q_1$ and $p_2 < q_2$ and $q_1 < p_2$
$[p_1, p_2]$ starts $[q_1, q_2]$	$p_1 = q_1$ and $p_2 < q_2$
$[p_1, p_2]$ ends $[q_1, q_2]$	$q_1 < p_1$ and $p_2 = q_2$
$[p_1, p_2]$ during $[q_1, q_2]$	$q_1 < p_1$ and $p_2 < q_2$

Figure 1.5: Prédicats Temporels d'Allen.[8]

Il fallait par la suite identifier une coquille SGBD spatiale vu qu'il y a besoin d'un moteur de gestion de données spatiales. Le choix tomba sur la coquille *Smallworld GIS*<sup>®TM</sup> doté d'un SGBD spatial hérité d'un système similaire à AutoCAD<sup>®TM</sup> [63].

Toutes les opérations qui furent conçues autour des composantes du *TST* furent codées en se servant du langage orienté-objet *Magik*<sup>®TM</sup> de *Smallworld GIS*. Ainsi, une riche batterie d'opérations fut obtenue. Les opérations permettent de formuler des requêtes spatiales, des requêtes temporelles et des requêtes spatio-temporelles.

La figure 1.6 présente l'interface du prototype *proof-of-concept*. Elle affiche une requête avec son résultat tabulaire.

The interface is titled "Query&Visualize" and is divided into several sections:

- Entities:** A list of entities including Household (1041, 1071, 1100) and Person.
- Spatio-Thematic Filter:** A section for filtering data based on spatial and thematic criteria. It includes a "Select Group" checkbox and a "Select From" dropdown menu. The filter criteria are: "sexe" (sex) set to "eq" (equals) and "F" (female). The filter is applied to the "Person" entity.
- Temporal Filter:** A section for filtering data based on time. It includes a "Person Query" tab and a "Trip Query" tab. The filter criteria are: "trip\_after\_activity\_purpose(purpose)" set to "T" (trip) and "trip\_after\_activity\_purpose" set to "T" (trip).
- Results:** A list of results showing the IDs of the selected entities: 490401, 494101, 52801, 591801, 593501, 617701, 617702, 621301, 646102, and 650702. The "Result Size" is 149.
- Results Table:** A table showing the results of the query. The table has columns: Person\_id, Event Order, Event Class, Event id, Origin Or Location, Mode Or Purpose, Event Start Time, and Event End Time. The table contains 10 rows of data.

Person_id	Event Order	Event Class	Event id	Origin Or Location	Mode Or Purpose	Event Start Time	Event End Time
523801	1	Trip	52380104	G1X1E1	C	15:00:00	15:02:00
523801	2	Activity	263	G1W4S6	M	15:03:00	16:29:00
523801	3	Trip	52380112	G1W4S6	C	16:30:00	16:34:00
523801	4	Activity	264	G1X1E1	D	16:35:00	19:59:00
593501	1	Trip	59350104	G1W4C3	Q	07:00:00	08:00:00
593501	2	Activity	290	G1V2L8	T	08:00:00	17:44:00
593501	3	Trip	59350112	G1V2L8	P	17:45:00	17:46:00
593501	4	Activity	291	G1W4C3	D	17:48:00	11:59:00
617702	1	Trip	61770204	G1W2M1	C	18:00:00	10:01:00
617702	2	Activity	319	G1X3Z6	T	10:02:00	17:58:00
617702	3	Trip	61770208	G1X3Z6	C	18:00:00	18:02:00
617702	4	Activity	320	G1W2M1	D	18:03:00	14:59:00
646102	1	Trip	64610204	G1X3S3	C	11:30:00	11:33:00
646102	2	Activity	321	G1W4C3	M	11:34:00	15:00:00

Figure 1.6: Requetes et Résultats [63].

La figure 1.7 affiche les *TST* suivis par des individus sur un espace urbain avec des couleurs et des symboles spécifiant leurs modes de transport et la motivation de leurs déplacements.

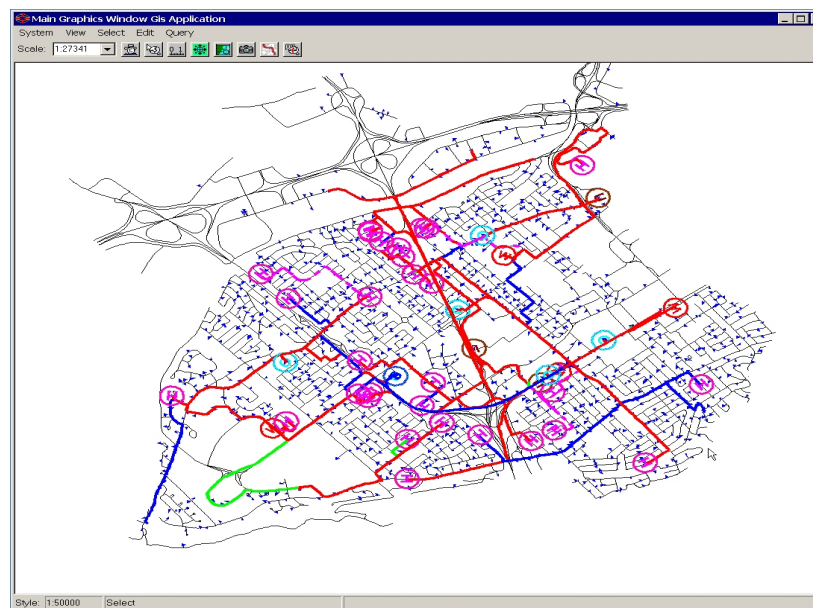


Figure 1.7: Affichage des trajectoires spatio-temporelles [63].

### 1.1.4 Conclusion

Cette recherche a ouvert des perspectives multiples d'investigation dont:

1. Développement d'un langage d'animation cartographique qui simule la dynamique spatiale sur l'axe temporel des objets mobiles. Cette perspective fut renforcée suite à la publication du papier [61] sur la révélation et l'animation d'un *TST*.

2. Les objets du prototype peuvent déployer une certaine dynamique suite à l'appel de certaines méthodes mais restent fondamentalement des objets statiques en attente d'activation. Transformer langage orienté-objet *Magik*<sup>®</sup> de *Smallworld GIS*. Les objets de l'application transformés en agents autonomes au sein d'un système multi-agents aideraient dans la simulation du comportement selon les profils des acteurs.
3. Enrichir l'ensemble des opérateurs par d'autres qui calculent les relations spatiales entre les *TST*, entre les *TST* et les lieux d'activités et entre les lieux d'activités [174].
4. Les opérations implantées sont associées aux objets de l'application. Par conséquent, l'objet *TST* est construit par des appels adressés aux objets *Move* et *Activity* faisant partie de la définition de l'objet *Person*. L'objet *TST* ne peut exister que si les appels retournent des valeurs validées. Il est dépendant des objets qui le composent. La solution serait dans la conception et le développement d'un *type abstrait de données*, *TAD* qui encapsule les activités et les déplacements et serait reconnu comme un type autonome indigène par les coquilles SGBD.

Dans la prochaine section, il est question du mariage du *Knowledge Discovery in Databases*, *KDD* et des systèmes d'information géographique *SIG* pour l'extraction des *TST*.

## 1.2 Extraction de *TST* par *Knowledge Discovery in Databases*, *KDD*

Le contenu de cette section provient de l'article:

Ali Frihida, Danielle J. Marceau, Marius Thériault (2004): *Extracting and visualizing individual space-time paths: An integration of GIS and KDD in transport demand modeling*. ***Cartography and Geographical Information Science*** 31(1): 19-28.

Le site <http://www.researchgate.net/> attribue au journal ***Cartography and Geographical Information Science*** un facteur d'impact de 0.830.

La disponibilité des données de l'enquête Origine-Destination de la ville de Québec et des opérateurs sémantiques et spatio-temporels développés et implémentés dans une étape précédente de la recherche (voir Section précédente) a ouvert la voix pour l'exploration des techniques de la découverte des connaissances dans les bases de données i.e. *Knowledge Discovery in Databases*, *KDD* [58, 121, 65]. Les données de l'enquête sont enregistrées dans une large table unique (*flat matrice*). Chercher des *patterns* utiles ou des relations significatives dans les données multivariées, spatiales et temporelles est une tâche fastidieuse. Le *KDD* offre un *framework* qui prétend résoudre ce problème.

Le *KDD* suppose cinq étapes:

1. Sélection des données représentatives du domaine de l'application.
2. Préparation des données par nettoyage et respecter la dimension temporelle
3. Transformer les données en réduisant les dimensions de la complexité.

4. Data mining pour repérer les *patterns*

5. Interprétation et évaluation des *patterns*, des relations et des découvertes.

D'autres chercheurs ont suggéré d'inclure la géo-visualisation et les systèmes d'information géographique pour optimiser les chances de la découverte scientifique.

Dans notre cas, la méthodologie adoptée était proche de celle du *KDD*. Nous avons re-cyclé les opérateurs sémantiques et spatio-temporels déjà développés pour créer une extension d'interrogation temporelle à l'aide du langage de script *Magik*®<sup>TM</sup> de *Smallworld GIS*.

Ajouté à cela, une matrice d'allocation de style (figure 1.8) fut conçue et développée afin de distinguer les *TST* quant à leur mode et motif de déplacement.





































Mode Purpose	Personal Vehicle	Taxi	Bus	Bike	Walking	Activity Place
Work						
Study						
Shopping						
Entertainment						
Home_Still						
Others						

Figure 1.8: Matrice d'allocation de style.

Une interface a été développée pour révéler les *TST*. La figure 1.9 affiche un *TST* dans un format tabulaire. Le bouton *Depict Path* permet d'afficher les déplacements.

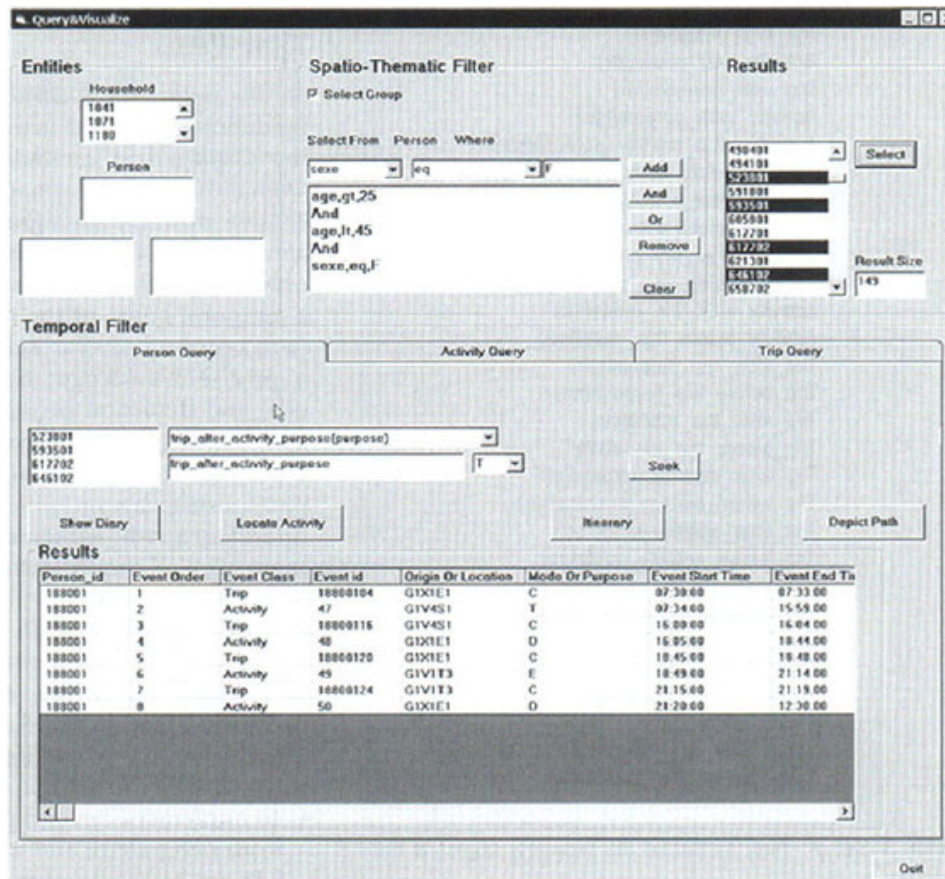


Figure 1.9: Interface d'extraction de *TST*.

L'innovation est que l'interface a débuté l'exploration de la possibilité de générer des séquences animées qui tracent les déplacements avec des couleurs qui représentent les modes et les motifs sur le fond de carte routière de la région de Québec. L'animation est rudimentaire et les fonctions de contrôle manquent sauf cet unique bouton *Stop* en bas à droite de la fenêtre de la figure d'affichage 1.10.

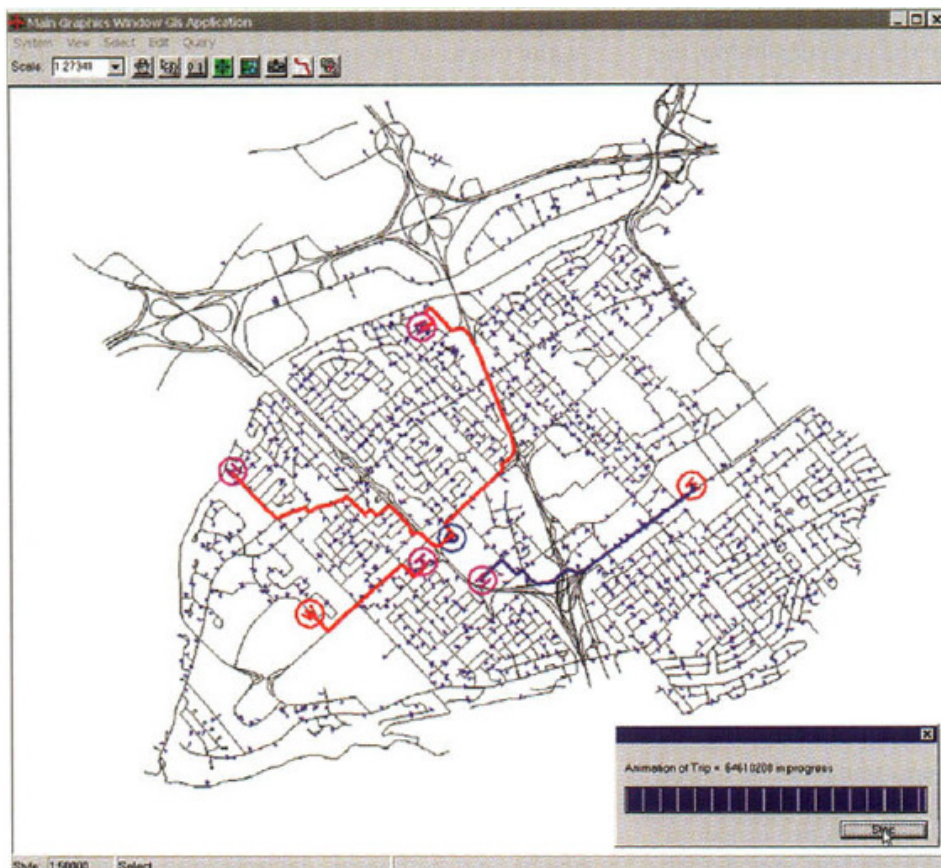


Figure 1.10: Affichage d'itinéraire.

En conclusion, l'extraction du *TST* en se servant des techniques *KDD* a permis de proposer une solution qui révèle les itinéraires d'une manière tabulaire, anime les déplacements sur un réseau routier. À part le manque des fonctions de contrôles, on s'attend à ce que les tracés des *TST* prennent l'allure des *spaghetti* vu qu'ils sont affichés sur un plan bi-dimensionnel.

Il fut conclu qu'il est plutôt préférable de concevoir un *TAD* qui encapsule les opérations de construction et d'interrogation des trajectoires spatio-temporelles. Ce type remplacerait efficacement l'approche *ad hoc* fondée sur un langage SQL dopé par des opérateurs temporeux de fabrication et d'interrogation du *TST*. En effet, en plus d'offrir un riche arsenal d'opérations d'analyse spatiale et temporelle et spatio-temporelle, le *TAD* assure une *portabilité SGBD* au prix de modifications minimales.

C'est l'objet d'une thèse de doctorat dont les résultats sont présentés dans la prochaine section.

### 1.3 Type Abstrait de Données Spatio-Temporel *TADST*.

Le contenu de cette section provient des résultats obtenus par une recherche de doctorat (Mme Donia Z. Triki) que je co-encadre et dont le but est la conception et le développement d'un type abstrait de données de trajectoire spatio-temporelle. C'est en fait la continuité la recherche commencée par ma thèse ci-dessus mentionnée.

Un *TAD* est défini comme étant un ensemble de données et d'opérations qui servent à manipuler le



dit type et qui peuvent être appelés par le développeur en toute transparence. Le *TAD* peut être défini algébriquement.

Un objet mobile est défini comme un objet spatial dont la forme et/ou la position change, d'une manière discrète ou continue, au cours du temps. La littérature mentionne un premier *TAD spatio-temporel* dans [47]. La rigueur formelle de la représentation des *TAD* a suscité un engouement pour des contributions scientifiques fondées sur des définitions algébriques des *TAD spatio-temporels* [81, 56, 114, 80]. Et ce en parallèle à des propositions d'extensions spatio-temporelles aux SGBD offrant plus de flexibilité [81, 141, 161, 189].

L'intérêt est porté sur des enveloppes formelles autour des primitives géométriques mobiles (point, régions). [142, 79, 156, 189] précisent les définitions formelles. [151] introduit une représentation minimaliste des trajectoires décrites par les objets mobiles à travers la prise en compte de la vitesse et la direction de la mobilité.

Somme toute, les recherches sur les *TAD* se sont plus orientées vers la modélisation géométrique et formelle. L'agrégation du dynamisme des objets mobiles en trajectoires persistantes et la dimension sémantique qui en découle ne sont pas sérieusement pris en compte lors du design des opérations. Ce qui explique d'ailleurs l'absence d'opérations classiques comme la différence, l'union et l'intersection des trajectoires.

L'objectif de cette recherche est alors la modélisation algébrique d'un *TAD spatio-temporel*, *TADST* qui encapsule les spécifications syntaxique et sémantique d'une trajectoire spatio-temporelle, *TST*. L'hypothèse avancée est que la *TADST* est la structure de données qui assurerait à la fois l'identité, la persistance du *TST* et son autonomie en tant que type de données distinct reconnu par les SGBD spatiaux comme un de leurs types de données conventionnels.

La définition du *TST* repose sur les travaux ci-dessus mentionnés (Section 1.1). En fait, le *TST* hérite les définitions formelles et les contraintes de l'itinéraire temporaire *P*. Dans la prochaine sous-section, les spécifications du *TADST TST* telles que définies dans [194, 64, 177] seront exposées.

### 1.3.1 Implémentation du type abstrait de données *TADST*.

La partie portant sur le formalisme de type abstrait de données spatio-temporel fut l'objet d'un article paru dans:

Donia Triki, Ali Frihida, Henda Hajjami Ben Ghézala, Christophe Claramunt: **Modèle et langage pour la manipulation de trajectoires spatio-temporelles**. *Revue Internationale de Géomatique*, 20(1): 37-64 (2010)

Selon le site <http://rig.revuesonline.com/accueil.jsp>, la *Revue Internationale de Géomatique* est indexée par PoP (**Publish or Perish**, <http://www.harzing.com/pop.htm>). La requête du 12/08/2013 sur le Facteur d'Impact (FI) des articles publiés par la revue entre 2001 et 2012 :

FI\* moyen = 13,30

FI\* médian = 10,50

\*FI = nombre de citations par papier publié dans la revue

Source/méthodologie : PoP (Publish or Perish, <http://www.harzing.com/pop.htm>)

La définition du *TST* reprend l'essentiel du développement présenté dans la section 1.1 et dont la figure 1.4 illustre quelques opérations. Elle l'enrichit par le formalisme algébrique standard associé à la déclaration d'un *TAD*. Les signatures et la sémantique des opérations du *TST* sont exposés dans les paragraphes qui suivent.

### 1) – Les constructeurs:

Les constructeurs sont les opérations qui permettent la création, l'ajout ou la suppression d'instances du *TST* [64, 194, 177]

2) – **Pré-Condition.** Pour une utilisation saine assurant la cohérence de la SGBD spatiale qui va héberger le *TST* et ses composantes (*Activity* et *Trip* (Move)), il faut vérifier leur validité (e.g. existence, valeur non nulle). L'assertion de la validité est la condition *sine qua non* de leur emploi dans les manipulations subséquentes.

**Check\_Activity** : *Activity* → *Boolean*

**Check\_Trip** : *Trip* → *Boolean*

**Check\_TST** : *TST* → *Boolean*

**Existe\_TST** : *TST* × *Instant* → *Boolean*

Les expressions mathématiques de la sémantique de ces opérations s'annoncent comme suit:

$$f_{Check\_Activity}(a) := a.t_s < a.t_e \wedge a.l \in Point \quad (1.10)$$

$$f_{Check\_Trip}(d) := d.t_s < d.t_e \wedge d.l_s \in Point \wedge d.l_e \in Point \wedge d.path \in Polyline \quad (1.11)$$

$$f_{Check\_TST}(tst) := (\forall 1 \leq i \leq n : Check\_Activity(a_i) \wedge Check\_Trip(d_i) \wedge d_i.l_e = a_i.l \\ \wedge d_i.t_e = a_i.t_s - 1) \wedge (\forall 1 < i \leq n : d_i.l_s = a_{i-1}.l \wedge d_i.t_s = a_{i-1}.t_e + 1) \quad (1.12)$$

$$f_{Existe\_TST}(t, tst) := tst.d_1.t_s \leq t \wedge t \leq tst.a_n.t_e \quad (1.13)$$

### 3) – Opérations Sémantiques.



Ces opérations retournent les composantes de la trajectoire qui répondent à certains critères sémantiques.

► **Comptage:**

La signature de l'opération du comptage se lit comme suit:

$$\mathbf{Trips\_With\_Purpose\_Count} : TST \times String \rightarrow Integer$$

Étant donné un objet  $tst$  de type  $TST$  et un objet  $m \in String$ , la sémantique de cette l'opération  $Trips\_With\_Purpose\_Count$  se traduit comme suit :

$$f_{Trips\_With\_Purpose\_Count}(tst, m) := x \in N : x = card(\{a \in A | m = a.type\}) \quad (1.14)$$

► **Positionnement:**

Ces opérations servent à retrouver la position d'un évènement sur la chaine du  $TST$ . On récupère ainsi un évènement, une liste d'évènements ou un entier indiquant une position. Les exemples de signatures de ces opérations sont les suivants:

$$\mathbf{Nth\_Activity} : TST \times integer \rightarrow Activity$$

$$\mathbf{Activities\_Before\_Trip} : TST \times Trip \rightarrow Alist$$

$$\mathbf{Position\_Trip} : TST \times Trip \rightarrow integer$$

L'exemple de la spécification sémantique est la suivante:

Soit un objet  $tst \in TST, d \in D, i \in N$  alors:

$$f_{Nth\_Activity}(tst, i) := a_i \in A \text{ if } 1 \leq i \leq n \quad (1.15)$$

$$\begin{aligned} f_{Activities\_Before\_Trip}(tst, d) &:= \{a_i \in A | 1 \leq i \leq max\} \text{ if } (d \neq d_1) \\ &\wedge (\exists 1 \leq max < n : d = d_{max+1}) \end{aligned} \quad (1.16)$$

$$f_{Position\_Trip}(tst, d) := i \in N^* \text{ if } \exists d_i \in D : d = d_i \quad (1.17)$$

► **Restriction:**

À partir d'un  $TST$ , on peut générer un sous- $TST$  qui contiendrait, selon les arguments sémantiques, des activités ou des déplacements.

L'exemple de la signature de l'opération est le suivant:

$$\mathbf{At\_Activity\_Activity} : TST \times Activity \times Activity \rightarrow TST$$

L'exemple de la spécification sémantique se présente comme suit:

Étant donné un objet  $tst \in TST$ ,  $a, aa \in A$ , alors:

$$f_{At\_Activity\_Activity}(tst, a, aa) := TADST(\{a, \dots, aa\} \subset A, \{Trip\_Before\_Activity(tst, a), \dots, Trip\_Before\_Activity(tst, aa)\} \subset D) \text{ if } \exists 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n : i < j \wedge a_i = a \wedge a_j = aa. \quad (1.18)$$

► **Recherche:**

Ces opérations permettent de chercher des événements dans le  $TST$  selon des filtres sémantiques comme le mode ou le motif du déplacement. Certaines permettent le parcours du  $TST$  dans une direction ou une autre (*forward*, *backward*).

L'exemple de la signature de ces opérations est le suivant:

$$\begin{aligned} \text{Next\_Activity\_With\_Mode} &: TST \times Activity \times String \rightarrow Activity \\ \text{Activities\_With\_Mode} &: TST \times String \rightarrow Alist \end{aligned}$$

Tandis que l'exemple de la spécification sémantique est:

$$\begin{aligned} f_{Next\_Activity\_With\_Mode}(tst, a, m) &:= e \in A \\ \text{if } \exists d \in D : d &= First\_Trip\_With\_Mode(At\_Activity\_Activity(tst, Next\_Activity(tst, a), Last\_Activity(tst)), m) \wedge d = Trip\_Before\_Activity(tst, e) \end{aligned} \quad (1.19)$$

$$\begin{aligned} f_{Activities\_With\_Mode}(tst, m) &:= \{a \in A \mid \\ &\exists d \in D : m \in d.mode \\ &\wedge a = Activity\_After\_Trip(tst, d)\} \end{aligned} \quad (1.20)$$

► **Projection:**

Cette opération est appelée quand l'utilisateur veut isoler des activités et des déplacements. L'exemple de la signature de l'opération s'écrit comme suit:

$$\text{Activity\_List} : TST \rightarrow Alist$$

ci-dessous, les spécifications sémantiques:

Soit un objet  $tst$  de type  $TST$ , alors:

$$f_{Activity\_List}(tst) := tst.A \quad (1.21)$$

- **Similarité:** Cette opération sert à tester si deux  $TST$  ont un même ordre d'évènements dénotant un comportement similaire. Ci-dessous, un exemple de la signature de l'opération et de sa spécification sémantique.

**Semantic\_Similarity** :  $TST \times TST \rightarrow Boolean$

Étant donné deux objets  $tst_1$  et  $tst_2 \in TST$ , alors:

$$\begin{aligned} f_{Semantic\_Similarity}(tst_1, tst_2) := & (card(tst_1.A) = card(tst_2.A)) \\ & \wedge (\forall 1 \leq i \leq n, \\ & card(tst_1.A), tst_1.A.a_i.type = tst_1.A.a_i.type \\ & \wedge tst_1.D.d_i.mode = \\ & tst_1.D.d_i.mode) \end{aligned} \quad (1.22)$$

- **Prédicats** Cette opération sert à tester si un  $TST$  est vide ou si un évènement en fait partie. Ci-dessous, un exemple de la signature de l'opération et de sa spécification sémantique.

**Include\_Activity** :  $TST \times Activity \rightarrow Boolean$

Soit un objet  $tst$  de type  $TST$  et une activité  $a$ , alors

$$f_{Include\_Activity}(tst, a) := (a \in A) \quad (1.23)$$

#### 4) – Opérations Spatiales

Ces opérations implantent le calcul de la projection, des relations topologiques, le voisinage spatial, la distance, la recherche et la similarité du domaine spatial de le  $TST$ .

##### ► Projection

Cette opération permet de restreindre le  $TST$  à sa dimension spatiale. Elle isole une image de l'itinéraire enchâssé dans le  $TST$ . Autant les lieux des activités que les chemins du parcours sont repérables. Ci-dessous, un exemple de la signature de l'opération et de sa spécification sémantique:

**Itinerary** :  $TST \rightarrow Polyline$

Étant donné un objet  $tst \in TST$  de cardinalité  $n \in N$  et soit  $concat$  qui construit une

polyligne agrégeant les polygones adjacents représentant le chemin parcouru:

$$f_{Itinerary}(tst) := \begin{cases} d_1.path & \text{if } card(tst.D) = 1 \\ l \in Polyline, l = concat(< d_1.path, \dots, d_n.path >) & \text{else} \end{cases} \quad (1.24)$$

► **Relations topologiques:**

Ces opérations sont concernés par les différentes relations topologiques entre les entités spatiales du *TST* (point, lignes et polygones). Ci-dessous, un exemple de la signature de l'opération et de sa spécification sémantique:

**TST\_Cross\_Polyline** :  $TST \times Polyline \rightarrow Boolean$

Étant donné les objets  $tst \in TST$ ,  $l$  polyline et soit une relation topologique *cross* alors:

$$f_{TST\_Cross\_Polyline}(tst, l) := Itinerary(tst) \text{ cross } l \quad (1.25)$$

► **Voisinage:**

L'étude du voisinage fait partie de l'analyse spatiale entre objets spatiaux. Les opérations retournent des valeurs logiques ou de distances calibrées. Ci-dessous, un exemple de la signature de l'opération et de sa spécification sémantique.

**TST\_SpatialNeighbour\_TST** :  $TST \times TST \times real \rightarrow Boolean$

Soit deux objets  $tst_1$  et  $tst_2$  et un réel  $s$ , alors:

$$f_{TST\_SpatialNeighbour\_TST}(tst_1, tst_2, s) := Neighbour(Itinerary(tst_1), Itinerary(tst_2)) \quad (1.26)$$

► **Calcul spatial:**

Le calcul spatial concerne les distances parcourues par les individus, entre les évènements, entre *TST* et entre les *TST* et les entités spatiales. Ci-dessous, un exemple de la signature de l'opération et de sa spécification sémantique.

**TST\_Distance\_Point** :=  $TST \times Point \rightarrow Real$

Soit un objet  $tst$  et un point  $p$  alors:

$$f_{TST\_Distance\_Point}(tst, p) := distance(Itinerary(tst), p) \quad (1.27)$$

► **Recherche:**

Ces opérations concernent le repérage d'entités au sein du *TST*. À titre d'exemple, il s'agirait de chercher des activités ou des déplacements qui se sont déroulés sur un espace particulier (point, polyligne ou région). Ci-dessous, un exemple de la signature de ces opérations et de leurs spécifications sémantiques.

**FirstActivity\_At\_Point** :  $TST \times Point \rightarrow Activity$

$$f_{FirstActivity\_At\_Point}(tst, p) := a_i \in A : (a_i.l = p) \wedge (if \exists j \neq i, 1 \leq j \leq n \text{ such that } a_j.l = p \Rightarrow i < j) \quad (1.28)$$

► **Similarité:**

Cette opération vérifie si deux  $TST$  ont effectué le même parcours.

**Spatial\_Similarity**:  $TST \times TST \rightarrow Boolean$

$$f_{Spatial\_Similarity}(tst1, tst2) := Itinerary(tst1) \text{ Equal } Itinerary(tst2) \quad (1.29)$$

5) – **Opérations temporelles**

Ces opérations permettent la manipulation des objets avec des critères temporels.

► **Relations:**

Ces opérations comparent les  $TST$  sur le plan temporel et ce en appliquant les relations temporelles entre trajectoires et entre trajectoires et unités temporelles. Ci-dessous, un exemple de la signature de ces opérations et de leurs spécifications sémantiques:

**TST\_After\_Time** :  $TST \times Time \rightarrow Boolean$

Étant donné un objet  $tst$  de type  $TST$  et un instant temporel  $t$ , alors

$$f_{TST\_After\_Time}(tst, t) := t < d_1.t_s \quad (1.30)$$

► **Durée:**

Le but de ces opérations est la quantification du temps pris pour effectuer des activités et des déplacements en termes de durée d'activités, de déplacements ou du  $TST$ . Ci-dessous, un exemple de la signature de ces opérations et de leurs spécifications sémantiques.

**Activities\_Duration** :  $TST \rightarrow real$

$$f_{Activities\_Duration}(tst) := \sum_{i=1}^n (a_i.t_e - a_i.t_s) \quad (1.31)$$

► **Restriction:**

La restriction permet de restreindre le  $TST$  à une partie de la trajectoire sur la base d'un instant ou d'un intervalle temporel. Ci-dessous, un exemple de la signature de ces opérations et de leurs spécifications sémantiques.

**At\_Time** :  $TST \times Time \rightarrow TST$

$$f_{At\_Time}(tst, t) := (a_i \in A, d_i \in D) \text{ if } \exists 1 \leq i \leq n : (t \geq d_i.t_s) \wedge (t \leq a_i.t_e) \quad (1.32)$$

► **Projection:**

Cette opération permet de récupérer uniquement les entités temporelles composantes du  $TST$ . Ci-dessous un exemple de la signature et de la sémantique de cette opération:

**First\_Time** :  $TST \rightarrow Time$

Soit l'objet  $tst \in TST$ , alors:

$$f_{First\_Time}(tst) := d_1.t_s \in Time \quad (1.33)$$

► **Recherche:**

Cette opération recherche des composantes du  $TST$  selon un critère temporel (instant ou intervalle). Ci-dessous un exemple de la signature et de la sémantique de cette opération:

**Activity\_At\_Time** :  $TST \times Time \rightarrow Activity$

Étant donné un objet  $tst \in TST$  et un instant  $t \in T^2$  alors:

$$f_{Activity\_At\_Time}(tst, t) := a_i \in A \text{ if } \exists 1 \leq i \leq n : t \geq a_i.t_s \wedge t \leq a_i.t_e \quad (1.34)$$

► **Similarité:**

Il s'agit de vérifier si deux  $TST$  sont de même taille et du même chaînage d'évènements. Ci-dessous un exemple de la signature et de la sémantique de cette opération:

$$\begin{aligned} f_{Temporal\_Similarity}(tst_1, tst_2) := \\ (card(tst_1.A) = card(tst_2.A) \wedge (tst_1.D.d_1.t_s = tst_2.D.d_2.t_s) \wedge (\forall 1 \leq i \leq n, \\ tst_1.A.a_i.t_s = tst_2.A.a_i.t_s \wedge tst_1.A.a_i.t_e = tst_2.A.a_i.t_e)) \end{aligned} \quad (1.35)$$

## 6) – Opérations spatio-temporelles

Il s'agit en premier lieu de construire des expressions combinant les opérations temporelles et les opérations spatiales. L'actuelle recherche a contribué par la conception et l'implantation d'opérations strictement spatio-temporelles telles que celles ensemblistes (égalité, différence, union, intersection) ou celles de localisation ou de vérification de voisinage spatial ou temporel à un instant ou à un lieu particulier. Ci-dessous, un exemple de la signature de ces opérations et de leurs spécifications sémantiques.

**Intersection** :  $Intersection : TST \times TST \rightarrow TST$

**Activities\_Intersection** :  $TST \times TST \rightarrow Alist$

**Interssects** :  $TST \times TST \rightarrow (Boolean)$

Étant donné deux objets  $tst_1$  et  $tst_2$  de type  $TST$ , alors  $f_{Intersection}(tst_1, tst_2)$  retourne:

- un objet  $TST$  qu'on dénomme ici *inter* et qui est le premier fragment de la chaîne et qui est inclus à la fois dans  $tst_1$  et dans  $tst_2$ . *inter* est retourné si ces conditions sont satisfaites:
  - (a)  $inter = (\{a_i, a_{i+1}, \dots, a_j\}, \{d_i, d_{i+1}, \dots, d_j\}) : 1 \leq i \leq \min(n_1, n_2) \wedge 1 \leq j \leq \min(n_1, n_2)$ ;  $n_1$  et  $n_2$  réfèrent aux longueurs de  $tst_1$  and  $tst_2$ ;
  - (b)  $inter \subset D_{TST}$  ;
  - (c)  $Includes(inter, tst_1)$ ;
  - (d)  $Includes(inter, tst_2)$ ;
  - (e)  $\exists! H : (H \subset D_{TST} \wedge Includes(H, tst_1) \wedge Includes(H, tst_2) \wedge TST\_Before\_TST(H, inter))$
- $\emptyset$  otherwise

#### 1.3.1.1 Données *benchmark* Origine-Destination.

Les données *benchmark* sont les mêmes que celles décrites dans la sous-section 1.1.1. Un nouveau modèle de données fut conçu et sept nouvelles tables furent générées à partir de la table originale de l'enquête O-D. À titre d'exemple, la table *Ménage, Household* comporte 4144 familles. La table *Personne, Person* comporte un échantillon de 9095 enregistrements correspondant chacun à une personne. Les sept tables constituent la base de données *benchmark* qui sera ciblée par les requêtes via le *TADST*. Les tables, la carte administrative et le réseau routier sont hébergés par la coquille SGBD spatiale PostgreSQL/PostGIS<sup>®</sup> [149, 148].

#### 1.3.2 Test du type abstrait de données *TADST*.

Cette section illustre le potentiel du *TST* à travers des requêtes adressées à la base de données *benchmark*. Le contexte du cas d'étude concerne la mobilité des individus au Centre Ville de Québec. Le papier original présente une description détaillée des requêtes avec, tout d'abord, la formulation textuelle puis l'implémentation par pl/pgSQL, le langage SQL de PostgreSQL/PostGIS. Les résultats obtenus sont présentés sous forme tabulaire et visualisés au besoin à l'aide du SIG open-source *Quantum GIS*.

Dans les paragraphes suivants, sont présentés trois exemples de requêtes tirées du papier résumant le contenu de la thèse de doctorat et adressé à une conférence internationale.

1. Requête 1 : « Quelles sont les trajectoires qui traversent, durant la journée, le Centre Ville (CV) à partir et vers des endroits différents situés hors du CV? »

La requête est formulée comme suit :

```
select Itinerary(pr.traj)
FROM personne pr, municipalites AS cv
where cv.nom_mun = 'Charlesbourg'
AND STT_Cross_Region(pr.traj, cv.zone)
AND not Equals(First_Point(pr.traj),
```

```

Last_Point(pr.traj))
AND not contains(cv.zone, First_Point(pr.traj))
AND not contains(cv.zone, Last_Point(pr.traj));

```

La figure 1.11 affiche les résultats sous la forme d'itinéraires sur la carte. Les lieux indiquant l'origine et la destination des trajectoires sont spécifiés avec des couleurs différentes et sont bien hors du CV.

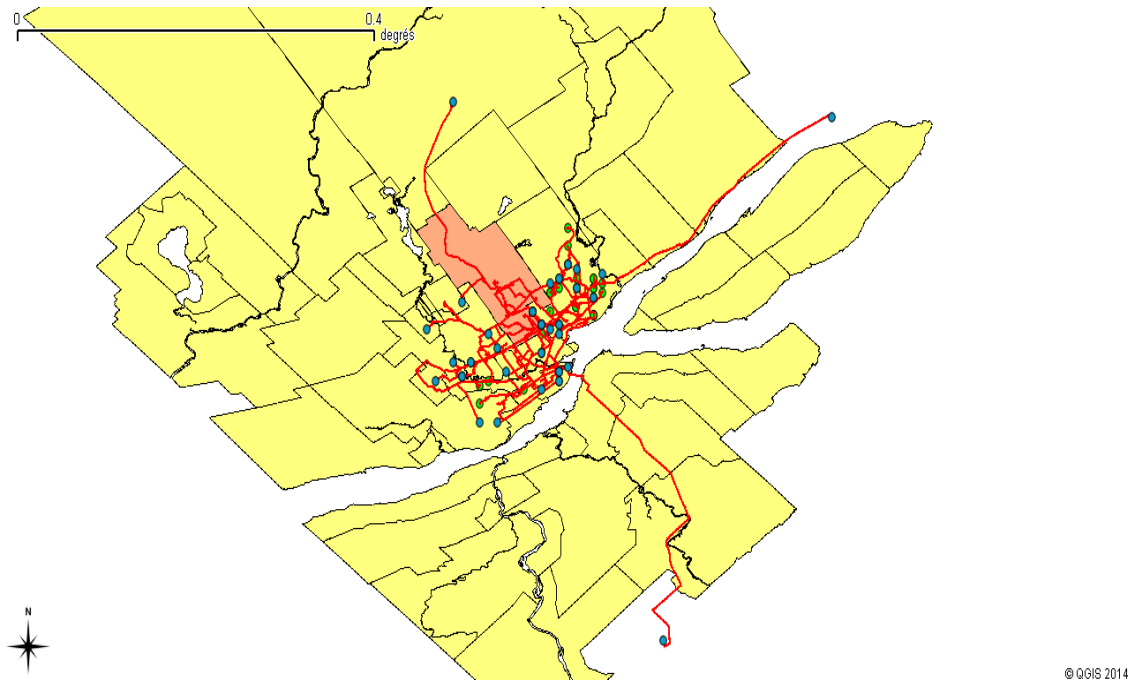


Figure 1.11: Résultats de la Requête 1

2. Requête 2 : « Quelles sont les personnes qui terminent leur journée en quittant le CV à partir de leur lieu de travail après 17h et en voiture? »

La requête est formulée comme suit :

```

SELECT pr.id
FROM (SELECT pr2.id AS pr2,
At_Activity_Activity(pr2.traj,
      Nth_Activity(pr2.traj,length(pr2.traj)-1),
      Nth_Activity(pr2.traj, length(pr2.traj)-1))
AS AtAA
FROM personne AS pr2) AS sous_requete,
personne AS pr, municipalites AS cv
WHERE pr2 = pr.id AND length(pr.traj) >=2
AND cv.nom_mun = 'Charlesbourg'
-- Conditions 1 and 4
AND contains(cv.zone,Last_Point(AtAA))
AND Activities_With_Type_Count(AtAA , '1') = 1
--Conditions 2 et 3

```



```

AND Last_Time(AtAA)::time >= '17:00:00'::time
AND not contains(cv.zone, Last_Point(pr.traj))
--Condition 5
AND Trips_With_Mode_Count(
    At_Activity_Activity(
        pr.traj, Last_Activity(pr.traj),
        Last_Activity(pr.traj)), '1') = 1
ORDER BY pr.id;

```

Les résultats sont affichés sur la figure 1.12. Les lieux des activités travail au CV (points verts) et les lieux de destination hors du C.V (points noirs) et l'itinéraire entre ces lieux qui a lieu en voiture (polylignes rouges).

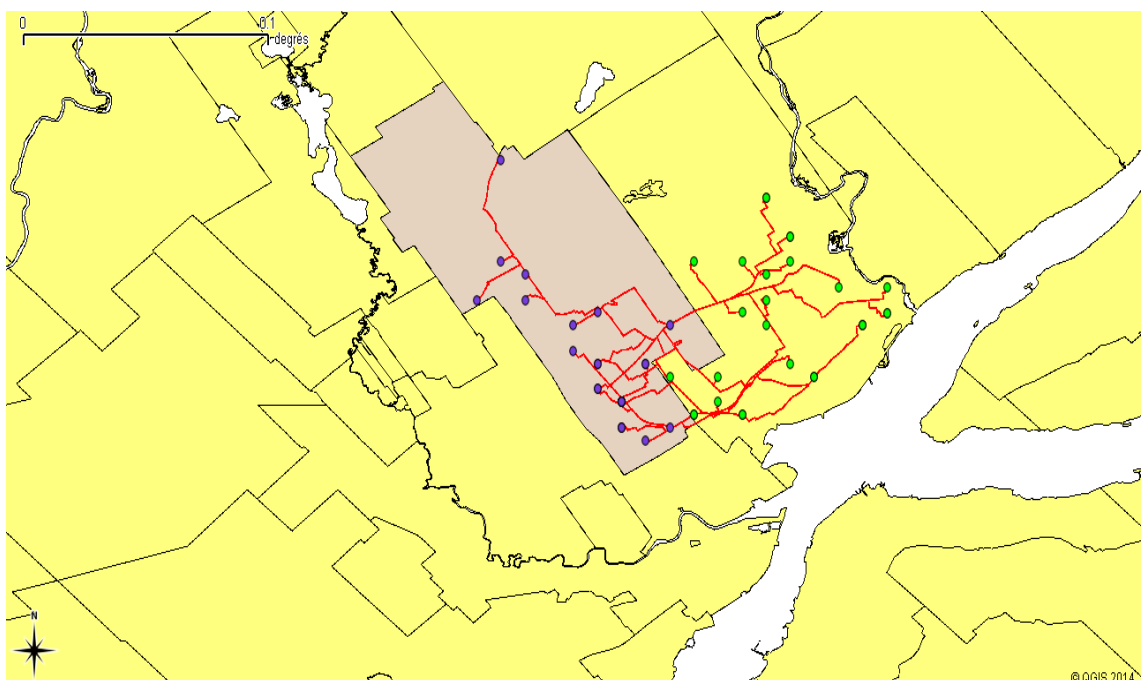


Figure 1.12: Résultats de la Requête 2

3. Requête 3 : « Quelles sont, pour chaque personne qui se déplace vers le CV au début de la journée, la durée et la distance de son déplacement? et que représente cette distance par rapport aux distances totales de leur trajectoires? »

La requête est formulée comme suit :

```

SELECT Spatial_Length(sous_traj),
       Trips_Duration(sous_traj),
       (Spatial_Length(sous_traj)*100)/
       Spatial_Length(traj))
FROM
    (SELECT At_Trip_Trip(pr.traj,
        First_Trip(pr.traj),First_Trip(pr.traj)) AS

```

```

sous_traj, pr.traj as traj
FROM personne AS pr, municipalites AS cv
WHERE cv.nom_mun = 'Charlesbourg'
AND not contains(cv.zone,First_Point(
    At_Trip_Trip(pr.traj,First_Trip(pr.traj),
                First_Trip(pr.traj))))
AND contains(cv.zone,Last_Point(
    At_Trip_Trip(pr.traj,First_Trip(pr.traj),
                First_Trip(pr.traj))))
) as sous_requete;

```

La figure 1.13 illustre les résultats d'exécution de cette requête sous forme tabulaire générée par PostgreSQL/PostGIS.

	spatial_length double precision	trips_duration interval	?column? double precision
1	0.0731506861929564	00:08:48	100
2	0.154875819822499	00:14:18	99.99999999999999
3	0.137364067336177	00:13:54	38.7133466104695
4	0.170180071572052	00:20:00	100
5	0.181433637534316	00:15:24	100
6	0.118937374736293	00:13:24	100
7	0.11067482304273	00:11:42	100
8	0.0604855302280922	00:08:00	100
9	0.0811255967974747	00:08:54	100
10	0.0937110794657406	00:12:30	55.1308442869069
11	0.0960984763252191	00:10:12	100
12	0.11690937462775	00:13:18	99.99999999999999
13	0.0727296644202252	00:09:18	100
14	0.260318611552659	00:24:06	87.4039680103597
15	0.156770703471956	00:14:48	88.0189843501474
16	0.136282190502348	00:33:00	100
17	0.173952191717188	00:17:42	95.1872715941506
18	0.0806437541913027	00:09:18	100
19	0.161714478102566	00:16:30	99.99999999999999
20	0.053211618624806	00:03:00	99.99999999999999
21	0.0538336272672807	00:00:12	99.99999999999999
22	0.0710729789990585	00:04:54	100
23	0.120930846442293	00:13:24	93.6421358432711
24	0.0553214153381624	00:07:00	100

Figure 1.13: Résultats tabulaires de la Requête 3

## 1.4 Conclusion

Les résultats obtenus par l'implantation du *type abstrait de données spatio-temporelles TST, TADST* font l'objet d'un papier intitulé **A Semantic-based Data Model for the Manipulation of Trajectories: Application to Urban Transportation** soumis le 10 janvier 2015 au **Web and Wireless Geographical Information Systems 2015, 21 and 22 May 2015, Grenoble, France**.

Globalement, la recherche a réalisé ses objectifs de développement d'un TAD dédié à la trajectoire spatio-temporelle dans le cadre théorique du *Time Geography*. Il reste à optimiser les opérateurs développés pour le *TST*. La quantité du travail demandée serait idéale pour une recherche de niveau Master. Ultérieurement, il est prévu d'intégrer les opérateurs temporels génériques aux coquilles

*Data Stream Management Systems, DSMS* qui hébergent les flot de données provenant de réseaux de capteurs. Le chapitre suivant porte sur ce domaine de recherche et présente la contribution de l'équipe *CONTOS*<sup>2</sup>.

# Chapitre 2

## Gestion des données de réseaux de capteurs sans fils.

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>RCSF et WoT. . . . .</b>	<b>39</b>
2.1.1	<i>WoT</i> . . . . .	40
2.1.2	Architecture et implantation . . . . .	40
<b>2.2</b>	<b>Traitement de requêtes sous RCSF. . . . .</b>	<b>41</b>
<b>2.3</b>	<b>Un nouveau <i>SNQP</i> sur RCSF RPL/6lowpan. . . . .</b>	<b>46</b>
<b>2.4</b>	<b>DSMS hybride spatio-temporel. . . . .</b>	<b>48</b>
2.4.1	La technologie RCSF/DSMS. . . . .	49
2.4.2	Modélisation spatio-temporelle et architecture de l'application. . . . .	50
2.4.3	Type abstrait de données pour RCSF. . . . .	51
2.4.4	Architecture, implementation et test. . . . .	56
2.4.5	Requêtes Spatio-temporelles des données RCSF. . . . .	59
<b>2.5</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>66</b>

---

### Introduction.

L'équipe de recherche *Cognition and Ontology of GeoSpatial Systems*, CONTOS<sup>2</sup> a commencé à intégrer la problématique des réseaux de capteurs sans fils (RCSF) depuis l'obtention d'un fond de recherche accordé par Le Centre de Recherches pour le Développement International (CRDI) du Canada via Enda Lead Africa en Aout 2010. CONTOS<sup>2</sup> a proposé un projet de *recherche-action* sur la pratique ancestrale de l'irrigation et la possible intégration des RCSF comme nouvelle TIC dans le savoir ancestral de l'eau sous une perspective participationniste. Un package RCSF de marque Meshlium<sup>®™</sup> compatible avec les normes ZigBee<sup>®</sup> composé d'un *router*, *sink*, *puits* et de cinq cartes multi-capteurs *Waspnotes*, *Motes* fut acquis.

Dans les paragraphes suivants, la technologie RCSF sera présentée. Par la suite, les contributions des membres de CONTOS<sup>2</sup> dans des rencontres internationales portant sur l'utilisation des RCSF et les papiers élaborés dans un but de publication seront exposés.

Les RCSF sont une technologie distribuée dans l'espace de collecte de données et composée de:

1. Une unité de traitement basé sur un micro-contrôleur qui gère l'intrant et l'extrant et procède au stockage des données
2. Une interface de communication basée sur un *transceiver* à fréquence radio sur fond de protocoles sans fils standardisées. Via un processeur de requêtes, le *transceiver* permet la formulation et la transmission des requêtes, la collecte et le *parsing* des données et leur affichage et/ou stockage.
3. Des nœuds-capteurs qui observent les phénomènes, collectent et renvoient des mesures via un routage multi-sauts *multihops* vers un nœud *router* qui peut, à son tour, transmettre les données vers des serveurs distants.
4. Un bloc d'alimentation qui fournit l'énergie pour le fonctionnement des composantes.

L'utilisation des RCSF se répand vu sa flexibilité et sa capacité de rendre compte des états de phénomènes spatiaux, humains et physiques surtout ceux inaccessibles ou dangereux.

Notre activité de recherche sur les RCSF a suivi trois chemins:

- Recherche-action sur l'utilisation des RCSF dans la prévision et l'alerte des glissements de terrain en exploitant le *Web of Things*, *WoT*.
- Recherche sur le traitement des requêtes par réseaux de capteurs
- Recherche sur les systèmes de gestion de données des capteurs *Data Stream Management System*, *DSMS*)

Dans une première contribution, des étudiants en master (mon encadrement) et en doctorat (mon co-encadrement) de l'équipe CONTOS<sup>2</sup> a proposé une plateforme Web basée sur les RCSF. L'application sous-jacente intègre le RCSF au *Web of Things*. Le but étant d'utiliser les flots de données RCSF comme sources d'information qui alimentent un modèle simple de prédiction et d'alerte des glissements de terrain [52].

## 2.1 RCSF et WoT.

L'approche consistait en une combinaison entre les RCSF et la technologie *WoT*. Partant du fait que la communauté menacée par les glissements de terrain ne dispose pas de services d'alerte, il lui fut proposé un service minimal qui affiche des données terrains recueillies par un RCSF, qui décide si la situation pourrait devenir plus critique et qui adresse des courriels d'alerte aux citoyens et aux

officiels locaux.

Les *motes* et le *router* Meshlium<sup>®</sup>™ furent programmés puis testés pour mesurer le taux d'humidité de l'air, la température, la pluviométrie, l'humidité et le déplacement du sol. Une fois calibré, le réseau fut déployé dans la région de Metline (Tunisie Nord-Est) connue par la fréquence de ses glissements de terrain.

### 2.1.1 *WoT*

Le *WoT* (<http://www.webofthings.org/>) réfère à une communauté de développeurs, chercheurs et concepteurs qui explore l'avenir du Web physique. Son objectif est d'influencer les normes du Web pour prendre en charge l'interconnexion de tout type de dispositif embarqué (capteurs, smartphones, etc) afin de faciliter leur intégration dans les applications Web classiques. La communauté *WoT* vise la construction d'un Web véritablement ouvert, flexible et extensible et croit que la mise au point et la publication des normes du Web sont la meilleure voie pour y parvenir.

### 2.1.2 Architecture et implantation

Pour l'implémentation de notre service d'alerte, le site <https://xively.com/> fut choisi comme site d'hébergement gratuit (ex- [www.cosm.com](http://www.cosm.com)). Xively fournit aux développeurs la plateforme, les outils (API, bibliothèques et workbench), la documentation technique et le soutien pour accélérer le développement des solutions.

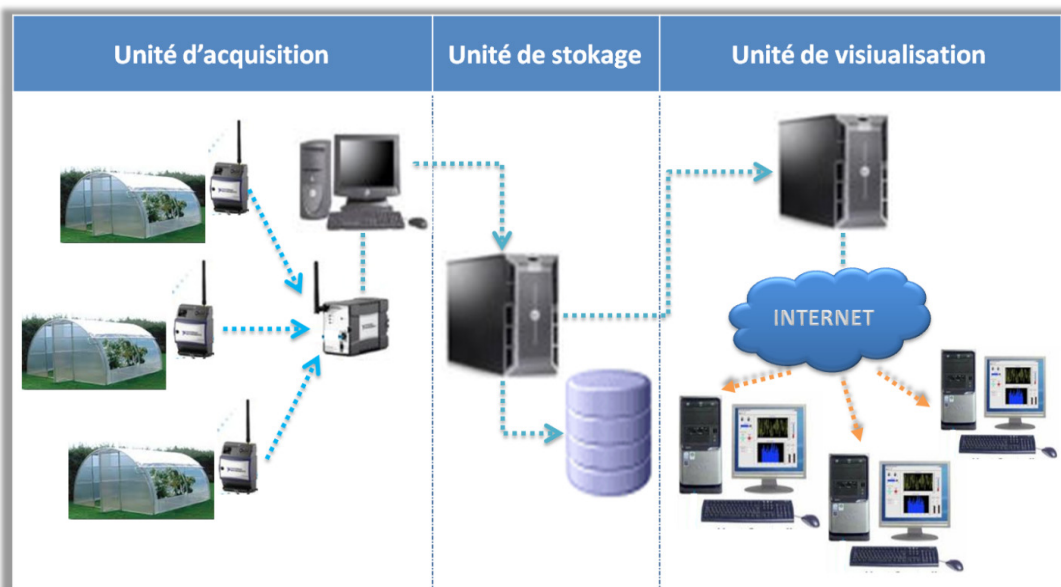


Figure 2.1: Architecture EWSL.[52]

Comme l'indique la figure 2.1, l'architecture de l'application se compose de trois unités :

1. Unité d'acquisition: Cette unité se sert du RCSF déployé sur terrain pour récupérer les mesures recueillies par les capteurs en renvoyées au router.

2. Unité de stockage: Cette unité héberge les données dans une coquille *SDMS* qui se charge de les gérer.
3. Unité de visualisation qui se sert des services de Xively pour afficher les mesures des capteurs. Des scripts sont intégrés dans la page Web de l'application. Ces scripts combinent les mesures recueillies par les capteurs et génèrent des alertes et des courriels si certains seuils critiques sont dépassés: e.g. saturation du sol, haut taux de précipitation, mouvement suspect du sol (figure 2.2).

L'application a été présentée au *First International Conference on Landslides' Risk, 2013, Tabarka, Tunisie*.

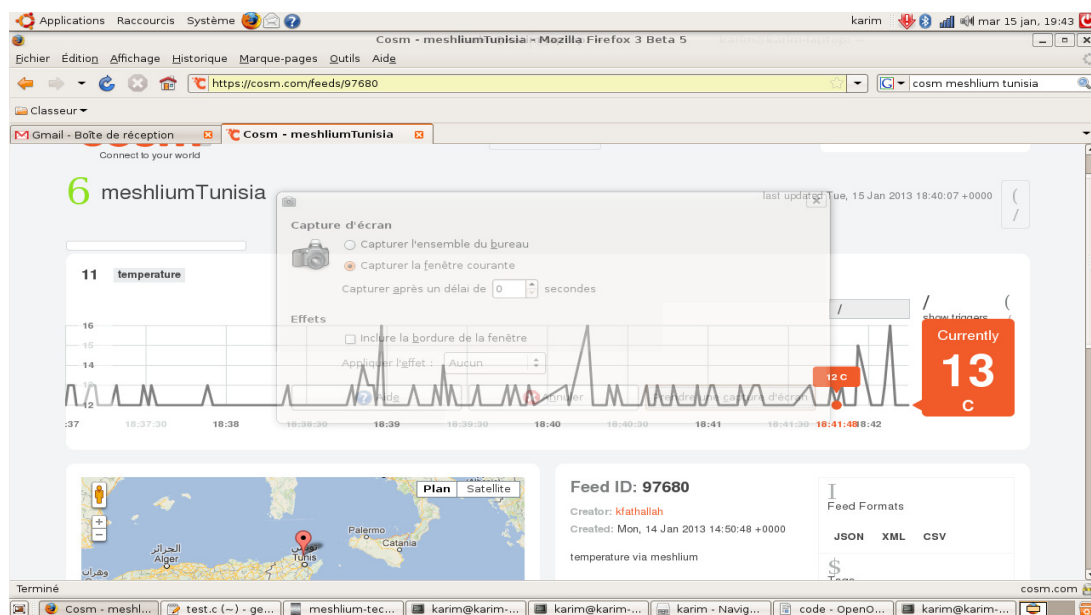


Figure 2.2: Affichage de la température sur Cosm.com (Xively.com).[52]

Les discussions avec les experts a convaincu l'équipe de remplacer les scripts de prévision de glissements de terrain par un ou des algorithmes basés sur des modèles utilisés par les professionnels du domaine. Actuellement, l'équipe est en phase de finaliser la recherche avant de commencer l'implémentation des procédures plus raffinées de détection.

Le second axe de la recherche sur les RCSF porte sur le traitement des requêtes. Des étudiants en master (mon encadrement) et en doctorat (mon co-encadrement) de l'équipe CONTOS<sup>2</sup> s'est penché sur une caractéristique fondamentale des RCSF: la gestion des requêtes.

## 2.2 Traitement de requêtes sous RCSF.

Le RCSF est un système logiciel embarqué quasi-autonome. Il dispose de ses propres ressources logicielles qui le font apparaître comme un SGBD. Il existe trois catégories de logiciels pour RCSF i.e. les systèmes d'exploitation, les interlogiciels dédiés côté réseau ou côté usager et les interlogiciels hybrides.

1. **Les systèmes d'exploitation RCSF.** sont généralement moins complexes que les systèmes d'exploitation ordinaires. Ils sont au départ des systèmes embarqués sur des cartes à micro-contrôleur. Les systèmes les plus utilisés dans le domaine des RCSF sont présentés dans les paragraphes suivants.

- ▶ Contiki: [38] Mis au point pour la gestion des micro-contrôleurs, Contiki est un système d'exploitation libre et gratuit (Free and open source) écrit en C. Il s'adapte bien à des ressources dotées de petites quantités de mémoire vive. Il peut s'exécuter sur une configuration typique de 2 kilo-octets de RAM et 40 Ko de ROM. Il supporte à la fois les protocoles de communication IPv4 et IPv6. Afin de faciliter le développement des logiciels sur Contiki, les éditeurs et les compilateurs sont intégrés dans un seul fichier.
- ▶ Mantis: [18] C'est un système d'exploitation libre et gratuit qui offre un environnement multitâche destiné aux nœuds capteurs. Il s'implémente sur une mémoire vive de moins de 500 octets. Il comprend le noyau, l'interpréteur de commandes et la pile réseau. Il permet la reprogrammation dynamique et le débogage à distance.
- ▶ TinyOs: [176] TinyOS est le premier système d'exploitation spécialement conçu pour RCSF. Il est basé sur un modèle de programmation événementielle. Les programmes TinyOS sont composés de gestionnaires d'événements. Lorsqu'un événement extérieur se produit, comme l'arrivée d'un paquet de données, TinyOS déclenche le gestionnaire approprié pour prendre en charge l'évènement .

2. **Les intergiciels RCSF.** L'intergiciel RCSF est une couche logicielle qui se place physiquement entre le matériel RCSF et les applications usagers. Elle a pour rôle de faciliter l'intégration des données issues du RCSF dans les applications utilisateur. Ces intergiciels peuvent être classés en trois catégories selon le lieu d'installation : côté réseau, côté station de base ou installation hybride.

(a) Les intergiciels côté réseau. Les exemples typiques d'intergiciels côté RCSF sont :

- ▶ Mate (Université de Berkeley) [115] : Il gère un RCSF comme une base de données abstraite. Celle-ci est fonctionnelle sur des nœuds capteurs dotés d'un système TinyOS. Flexible, Mate permet d'ajouter des extensions selon les besoins et d'optimiser l'exploitation des ressources.
- ▶ Impala (Université de Princeton)[119] : Il présente un système modulaire qui permet d'améliorer la performance des applications, de minimiser la consommation d'énergie et de garantir la stabilité.
- ▶ Agila (Université de Washington) [55]: Ce système se base sur des agents mobiles permettant de transférer des codes ainsi que les états des nœuds. Il s'exécute sur des nœuds équipés de TinyOS. Il permet à chaque nœud de jouer le rôle d'agent. Dans chaque nœud, Agila maintient la liste d'adresses de ses voisins. Cette liste est utilisée lors du transfert des données.

(b) Les intergiciels côté station de base.

Parmi les exemples typiques d'intergiciels installés côté station de base, on peut citer :



- Cougar (Université Cornell) [190]: Au début des années 2000, Cougar innove par une approche qui considère les données des capteurs comme une base de données abstraite dotée d'un langage proche du SQL. Il définit un système de gestion de base de données de capteurs, composé de base de données et de requêtes. La base de données de capteurs contient à son tour des données stockées et des données captées. Les données stockées sont représentées comme des relations et elles comprennent l'ensemble des caractéristiques des capteurs ainsi que celles de l'environnement physique.
- SINA (Université du Delaware) [166]: SINA considère le RCSF comme base de données abstraite. Pour la réalisation d'une gestion adaptative des nœuds de capteurs, SINA modélise le réseau comme des objets distribués. Son noyau fournit des mécanismes efficaces permettant une efficacité énergétique. Son architecture repose sur une abstraction de base de données en feuilles de calcul pour l'interrogation et la supervision. Une feuille de données est composée de cellules logiques, où chaque cellule représente l'attribut d'un nœud de capteurs. Le réseau de capteurs, dans son ensemble, est considéré comme une collection de feuilles de calcul. Les cellules sont maintenues et mises à jour périodiquement à partir du réseau de capteurs.
- Milan (Université de Rochester) [88]: Il se base sur un plan de ressources afin de minimiser la consommation d'énergie. Expérimenté dans le domaine médical, ce système offre une fiabilité élevée dans la satisfaction des exigences des différents types de données médicales souhaitées par l'utilisateur. Milan active les capteurs adéquats selon le plan de mesure et offre des services de collecte des mesures et de transfert vers l'utilisateur.

3. **Les intergiciels hybrides.** Les intergiciels hybrides combinent les services côté réseau et ceux côté utilisateur et offrent un traitement distribué. La première partie de ce traitement s'effectue au niveau de la station de base. La deuxième partie s'effectue dans les nœuds du réseau de capteurs. Parmi les interlogiciels les plus connus:

- DsWare (Université de Virginie) [117]: Il considère le RCSF comme base de données abstraite. Il permet des services tels que les requêtes, le stockage des données, la direction de groupe pour la prise de décision, la détection d'évènements, l'ordonnancement et la réduction de la consommation d'énergie. Il utilise un langage clone de SQL.
- TinyDB (Université de Berkeley)[122]: Comme DsWare, il considère le RCSF comme base de données abstraite. Il fournit une interface simple pour des requêtes SQL. L'architecture de TinyDB offre à l'utilisateur, un fichier base de données appelé *sensors*, stockant les valeurs collectées à partir du réseau de capteurs. Il utilise un algorithme d'optimisation de consommation d'énergie. TinyDB dispose d'un interpréteur de requêtes distribuées s'exécutant sur chaque nœud du réseau. Les usagers peuvent soumettre leurs requêtes à partir de la station de base où elles sont optimisées. La requête optimisée est, par la suite, transmise via le réseau. TinyDB détermine où et à quel ordre les données devraient être collectées afin de minimiser la consommation d'énergie. Les différents types de requêtes supportés tels que les évènements, les requêtes d'agrégation et d'activation offrent des services utiles aux applications réseaux. TinyDB prend également en charge l'enregistrement des données et la supervision de l'état du réseau.

- Cosmos [104]: Il constitue une plate-forme générique fonctionnelle à des multiples de RCSF hétérogènes. Cet intergiciel est conçu pour fonctionner sans intervention humaine. Cosmos offre une abstraction du RCSF dite interface générique du RCSF. Il permet entre autres d'optimiser les requêtes, d'intégrer des données hétérogènes et de faire un traitement intelligent sur les données. Ce dernier consiste surtout en la gestion des événements, la fouille des données captées et le traitement d'information contextuelle.

Comme le texte ci-dessous l'a signalé, le RCSF est désormais considéré comme une abstraction de base de données (parfois distribuée). Par conséquent, la recherche, l'accès et le traitement des données se fait selon l'approche traditionnelle avec langage de requête, moteur de recherche, intégrité et persistance de données. L'abstraction a été utile dans la mesure où son haut niveau permet une interrogation sur l'efficacité des solutions actuelles et de proposer des approches plus performantes.

À ce titre, l'équipe CONTOS<sup>2</sup> a effectué une recherche sur les processeurs de requêtes des RCSF *Sensor Network Query Processor, SNQP*. Les résultats de la recherche ont été présentés lors de l'*International Conference on Information Processing and Wireless Systems, IPWIS-2013* [50].

Ainsi, un *SNQP* possède une architecture comparable à la figure 2.3.

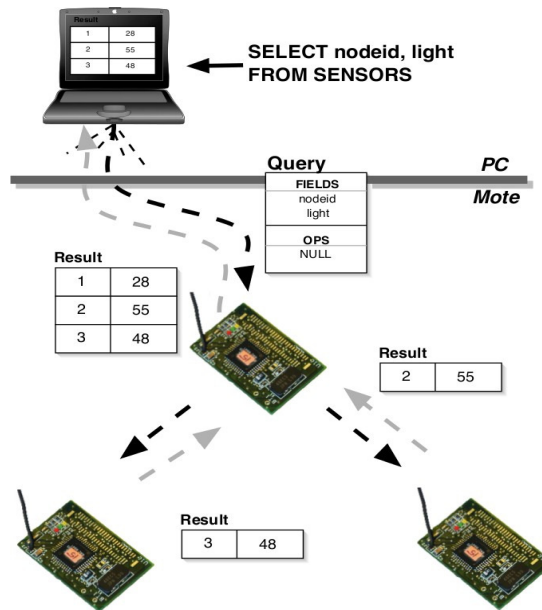


Figure 2.3: Schéma d'un SNQP [50].

Les requêtes sont formulées puis soumises aux capteurs à partir du côté serveur *PC* qui se charge aussi de recueillir les mesures. En fait, le *SNQP* intègre un moteur de recherche qui n'est pas sans rappeler celui essentiel dans un SGBD classique. Les capteurs *Motes* dotés de modules embarqués exécutent des traitements distribués.

Les requêtes sont écrites dans un langage dit *Continuous Query Language* qui est une variante de SQL déclaratif. Les requêtes sont adressées aux capteurs selon des termes prédéfinies temporellement (e.g. température toutes les 30 secondes du capteur #5). Les observations obtenues sont évaluées continuellement et incrémentalement en se servant des techniques de gestion de flots de

données[119, 191].

La littérature cite plusieurs *SNPQ* dont un grand nombre fait partie des intergiciels RCSF comme exposé dans sous section 2.2 e.g. SINA, Cougar , DsWare, TinyDB, etc.

Dans ce qui suit, les *SNPQ* les plus récents ( $\geq 2011$ ) seront présentés:

- SwissQM [131] (Université de Zurich). Le *SNPQ* propose un support multi-usager, un langage déclaratif de haut niveau et reconnaît les modèles de données relationnel ou XML. Il intègre les fonctions définies par l'utilisateur, accepte l'interrogation fenêtrée *windowed queries* et gère les événements complexes au niveau des capteurs. Il est dit flexible et extensible.
- TikiriDB [162]. Il propose un genre de SQL dit TikiriSQL pour l'interrogation des capteurs. TikiriSQL est comparable au SQL classique mais adapté à l'environnement réseau du *Continuous Querying*. Ainsi, il peut formuler des requêtes qui interrogent certains capteurs selon un intervalle de temps prédéfini. Les résultats sont ajoutés à une table dont le volume s'accroît avec le temps. TikiriDB est programmable et inclut une bibliothèque de fonctions et un compilateur pour formuler, corriger et adresser les requêtes de l'utilisateur. Les résultats obtenus sont organisés puis présentés.
- Corona [103] (Université de Sydney). Avec Corona, les requêtes peuvent être stockées puis récupérées. Il offre une GUI pour la formulation des requêtes visuelles et pour l'affichage des résultats. Il propose aussi un environnement *RAD* pour des applications impliquant *SNQP* et Web.
- SNEE [66] (Université de Manchester). Ce système considère le RCSF comme une infrastructure de traitement distribué. Il propose un *SNQP* qui diffère des précédents par 1) la transformation des requêtes en code exécutable ce qui augmente la rapidité, 2) l'offre d'un langage plus expressif i.e. *SNEEQL* disposant des procédures classiques de traitement distribué et 3) l'accès aux nœuds et aux données même dans un RCSF hétérogène.

En dehors du problème récurrent de la conservation de l'énergie, des contraintes de la bande passante et de l'hétérogénéité des réseaux, l'étude des *SNQP* a révélé une veine de recherche qui porte sur trois problèmes:

1) *Web of Things, WoT* et *Sensor Web Enablement, SWE*.

Le *WoT* est la vision où tout dispositif embarqué doit être connecté au Web dont les RCSF. Pour cette fin, l'organisme de normalisation *Open Geospatial Consortium, OGC* [134] a proposé des services, normes, modèles sous le terme *Sensor Web Enablement, SWE* [24, 136]. Selon ces normes, les données RCSF doivent être encodées en XML ce qui facilite leur intégration avec d'autres services Web offerts par l' *OGC* [134] comme le *Web Map Service, WMS* et le *Web Feature Service, WFS* qui sont les deux principaux services cartographiques des serveurs de données spatiales. Somme toute, le *SWE* assure une interopérabilité entre RCSF hétérogènes et garantit la publication des données RCSF sur les infrastructures des données spatiales.

Comme pour toute norme, l'implémentation des normes *SWE* est laissée à la discrétion des

développeurs. Ainsi, aucun des *SNQP* revus auparavant ne respecte les normes *SWE* quand à la production et la publication des données qu'il recueille. L'explication réside probablement dans le caractère expérimental et/ou académique des produits. Une fois passé le baptême de feu du marché, ces produits vont probablement se mettre aux standards. L'intégration des données RCSF au sein du *WoT* se fera alors plus aisément. Mais d'ici ce temps, le domaine de la recherche restera actif.

2) *SNQP* sur *6LoWPAN*, *IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks*.

L'intégration dans le *WoT* ne sera que facilitée par l'adoption des normes *Routing Protocol for Low power and Lossy Networks*, *RPL/6lowpan* définies par l'*Internet Engineering Task Force*, *IETF* [130]. Ces normes proviennent du besoin de connexion internet (directe ou indirecte) de tout dispositif même le plus petit, à faible puissance ou à capacité de traitement limitée (e.g. nœuds RCSF). Seuls TinyOS [176] et Contiki[38] les intègrent par défaut. Cela signifie qu'aucun des *SNQP* revus n'est compatible avec *RPL/6lowpan*. La sous-section dans 2.3 est consacrée à la proposition d'un prototype *Qlowpan*.

3) La persistance des donnée RCSF, leur historique et leur sémantique. Une proposition de solution à ce problème sera exposée dans la sous-section dans 2.4.

## 2.3 Un nouveau *SNQP* sur RCSF RPL/6lowpan.

Le *RPL/6lowpan* [178, 160, 37, 175, 32, 30, 27, 94] répond au besoin de connexion de tout dispositif même le plus petit, à faible puissance ou à capacité de traitement limitée (e.g. nœuds RCSF). C'est un protocole émergent qui commence à changer radicalement le paysage *WoT*. Il propose des avantages certains dont un mode d'adressage presque illimité couvrant  $2^{128}$  différent IP (comparativement aux  $2^{32}$  offerts par le IPv4). Sur la gamme des *SNQP* revus ci-dessus aucun n'est franchement compatible avec *RPL/6lowpan*. Afin de combler cette lacune, l'équipe a entamé une recherche action qui vise à développer un *SNQP* qui reconnait les RCSF basés sur un système *RPL/6lowpan*.

Le *Qlowpan* [51] est un *SNQP* pour RCSF à faibles ressources. Il se base sur les normes *RPL/6lowpan* pour assurer l'interopérabilité. Au mieux de notre connaissance, c'est le premier *SNQP* compatible avec *RPL/6lowpan*.

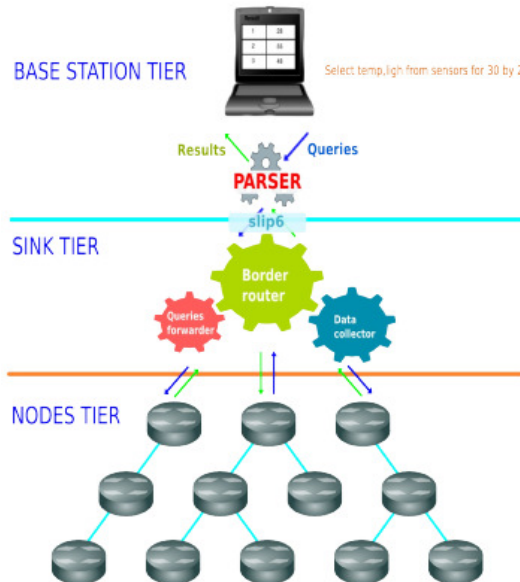


Figure 2.4: Architecture de Qlowpan.[51]

Comme le montre la figure 2.4, *Qlowpan* se compose de trois couches:

- 1) Couche station de travail: C'est l'interface composée des modules et des fonctions *Qlowpan* offerts à l'utilisateur lui permettent de formuler, de compiler et transmettre les requêtes puis de visualiser les résultats récupérés (grâce entre autres à *netcat*). En fait l'interface est basée sur un protocole IPv6 en liaison avec un UDP *User Datagram Protocol* côté *router*. Les requêtes sont interprétées par un analyseur syntaxique et lexical *lex/yacc*. Sur réception des messages, l'analyseur extrait les champs pertinents, les formate dans un nouveau message qui sera affiché sur la station de l'utilisateur.
- 2) Couche *router*: le rôle du *router* est de transmettre les requêtes aux nœuds par *multicast* [91].
- 3) Couche capteurs: les principales tâches de cette couche sont:
  - a. Analyse de la requête
  - b. Collection des données
  - c. Création des paquets de données
  - d. Transmission des paquets de données

La première tâche est exécutée à la réception de la requête. Les trois dernières sont répétées continuellement durant la vie de la requête. Les paquets de données recueillies sont transmis au *router* sur la base des protocoles RPL.

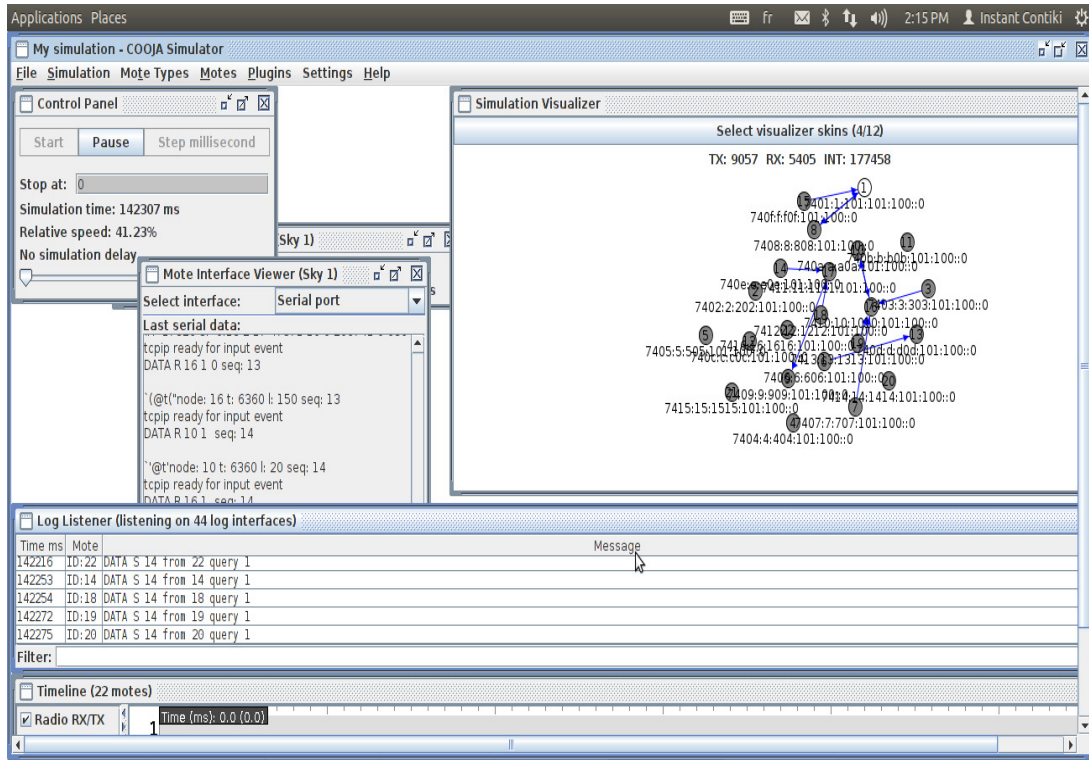


Figure 2.5: Simulation Qlowpan sur Cooja de Contiki.[51]

Le *proof-of-concept* *Qlowpan* avait été testé avec succès sur le simulateur *Cooja* [178] de *Contiki* [38] comme le montre la figure 2.5.

Le prototype *Qlowpan* ouvre des nouvelles perspectives de recherche qui rejoignent des intérêts relatifs à la persistance et la révélation de la sémantique des données.

## 2.4 DSMS hybride spatio-temporel.

Le texte est la traduction d'un papier intitulé **Hybrid Data Streams Management System for Temporal WSN** soumis au journal **Pervasive and Mobile Computing** depuis le **26 décembre 2014**.

Le développement d'applications se servant du *Data Stream Management System*, *DSMS* sur RCSF est actuellement handicapé par deux limites: ressources énergétiques et capacité de stockage limitées. Si l'abstraction est faite du problème de la courte durée de vie des batteries, il est possible d'avancer qu'un couplage DSMS/SGBD permettrait le développement d'applications relativement complexes qui exploitent les flots de données temps réel et les données archivées comme une application spatio-temporelle. Dans ce papier, une base de données RCSF hybride qui tire profit du potentiel validé des SGBD et des percées technologiques enregistrés en DSMS. Cette approche serait utile pour une variété d'applications basées sur les observations captées par RCSF comme les serres et l'agriculture de précision, les glissements de terrain et les activités sismiques, les déversements des huiles et les nuages de gaz toxiques, les finances et le trafic routier. Par sa

capacité de sauvegarder plusieurs générations d'observations, la BD hybride définit un dépôt des données pour l'analyse, la mitigation, la prise de décision et la découverte des tendances dans les séries temporelles d'observations archivées. Dans une première section, les composantes d'un RCSF seront détaillées. Dans une seconde section, une revue de littérature condensée portant sur la modélisation spatio-temporelle suivi d'une esquisse de l'architecture du DSMS hybride. La troisième section propose un type abstrait de données temporel *TADT* dont le but est de faciliter les requêtes temporelles des observations. Des tests seront effectués sur le *TAD* pour vérifier ses fonctionnalités. Les résultats sont obtenus grâce à la solidarité de l'équipe de recherche CONTOS<sup>2</sup>.

### 2.4.1 La technologie RCSF/DSMS.

Un RCSF est une collection de nœuds distribués dans l'espace de collecte de données et composée de:

1. Équipement RCSF: Chaque nœud se compose de quatre composantes: une unité d'alimentation, un micro-contrôleur, une interface de communication radio et des capteurs. Ces derniers collectent les mesures des phénomènes sous observation et les transmettent au nœud le plus proche jusqu'à atteindre le *sink*. Le *sink* agit comme *router* et transmet les données à un serveur via les canaux de communication disponibles [43, 150, 72, 6]. Les RCSF sont deployables selon quatre topologies: en étoile, point-à-point, en arbre ou hybride. La consommation d'énergie et par conséquent la disponibilité sont les problèmes les plus critiques de cette technologie [70, 169, 166].
2. Logiciels RCSF: Les nœuds hébergent essentiellement deux catégories de logiciels:
  - (a) Les systèmes d'exploitation (SE) des ressources du RCSF. La littérature mentionne différents ES dédiés au RCSF comme Contiki [38], Mantis [18], TinyOS [176].
  - (b) The Sensor Network Query Processing Systems (SNQP) ou SensorDB [122]: c'est un *middleware* qui agit comme environnement de formulation et de traitement de requêtes *Query Processor*. Il abstrait le RCSF en une base de données distribuée. Plusieurs SNQP sont cités dans la littérature. Le plupart d'entre eux est développée dans les laboratoires académiques. Les plus populaires sont:
    - TinyDB (University of Berkeley)[122],
    - Cougar (Cornell University) [190],
    - DsWare (University of Virginia) [117],

D'autres sont disponibles comme Mate [115], Impala [119], Agila [55], SINA [166], Milan[88], Cosmos [104], SwissQM [131], TikiriDB [162], Corona[103] and SNEE [66]. Une revue exhaustive est disponible sur [89].

La technologie RCSF a aidé l'émergence de *Data Stream Management System*, *DSMS*. C'est une sorte d'extension aux SGBD classiques où le flot de données *data stream* est la principale abstraction

à la place de la relation[70]. STREAM [43], GigaScope [150] and TelegraphCQ [55] sont des exemples de DSMS.

Les flots de données ont des caractéristiques identifiées dans [166, 7, 71] et exigent des approches spécifiques sur le plan de la gestion.

Dans le DSMS, le SNQP exécute des requêtes formulées à l'aide du *Continuous Query Language, CQL* qui est un SQL dédié RCSF [68]. Le SNQP interroge les nœuds pour recueillir des observations. Les données sont stockées dans la mémoire des nœuds. Dans certains cas, un nœud est dédié au stockage. Si les données sont stockés à l'extérieur de RCSF, les données sont transmises vers des mémoires secondaires externes [119, 129].

Notre objectif est de concevoir et implémenter le prototype d'une application spatio-temporelle DSMS/SGBD qui offre les services du SNPQ et du SGBD tant au stockage qu'à l'interrogation des données. Ainsi, cette application bénéficiera du meilleur de deux mondes SGBD/SNPQ. L'application présentera une interface unifiée qui permet de visualiser autant les observations en temps réel que les résultats obtenus par le requêtage spatio-temporel des séries historiques des données archivées.

## **2.4.2 Modélisation spatio-temporelle et architecture de l'application.**

Plusieurs modèles de données spatio-temporels furent développés. Reste que le domaine reste actif à cause de la complexité, la diversité des phénomènes humains et physiques et l'absence d'un consensus sur un modèle particulier. Plusieurs revues de littérature sur la question sont disponible sur le Web. Certaines font partie d'articles scientifiques:

- Des représentations intégrées des relation espace-temps utilisables en modélisation des dynamismes sont proposées dans: [186, 192, 33, 36, 140]
- Des données brutes de transport tirées d'une enquête-origine destination sont transformées en des BD spatio-temporelles pour l'analyse du comportement de transport [184, 63, 28, 164].
- Des modèles de données sont enrichis par le développement de types abstraits de données qui encapsulent les dimensions temporelles, spatiales and sémantiques des trajectoires [47]. Les principaux concepts du Time Geography [84, 128] sont formellement définis dans [194] et des contraintes sont considérés lors du modelisation dans [75].

D'autres revues de littérature sont produites comme:

- Les papiers de [159, 3, 157, 107, 141, 165, 155] sont des exemples classiques de revues de littérature décrivant l'état actuel et dégagent les tendances futures du domaine.
- Les papiers et les ouvrages concernés par les bases de données spatiales et les base d'objets mouvants et par l'utilisation des types abstraits de données pour la modélisation des trajectoires [48, 82, 79, 189].



La recherche sur les DSMS spatio-temporels est encore dans ses premiers pas. L'intérêt actuel porte surtout sur les problèmes pressants comme la conservation de l'énergie, le test d'algorithmes distribués, l'optimisation des requêtes ou les stratégies d'allocation mémoire. Parmi les rares travaux exploratoires sur la modélisation spatio-temporelle des RCSF, [97] propose une approche pour implémenter une solution spatio-temporelle qui suggère de stocker les données sur le nœud lui-même qui sera ciblé par les requêtes ultérieurement. Cette approche soulève des interrogations comme:

- Juste une partie des données observations va être sauvegardée. Et cette décision va avoir son impact sur la précision des données récupérées ultérieurement.
- Le requêtage spatio-temporel suppose une riche bibliothèque qui est difficile à implémenter sur le SNPQ.
- Les SNPQ disponibles ne traitent pas les requêtes complexes et offrent des services relativement basiques d'analyse ou d'affichage de données.
- Les exigences de la qualité des données rendent la considération de l'espace et du temps dans les tâches de stockage un problème complexe et critique.
- L'absence d'un manager de données historique qui organise les générations de données selon les besoins et contrôle l'accès aux observations archivées .

Dans [4], le schéma d'un *Historical Data Query processing, HDQP* est proposé. Le schéma s'articule autour des solutions d'indexation quad-tree, de compression et d'échantillonnage des données qui seront stockées sur les nœuds. Il est évident que cette recherche ne s'intéresse pas aux problèmes du requêtage spatio-temporel complexe comme ceux résolus par les SGBD classiques et ne mentionne pas un prototype fonctionnel comme *proof-of-concept*. Dans la section suivante, un modèle de données RCSF spatio-temporel suivi d'un type abstrait de données temporel seront exposés.

### 2.4.3 Type abstrait de données pour RCSF.

#### 2.4.3.1 Modèle de données spatio-temporel pour RCSF.

Notre application réfère aux observations collectées d'un point fixe. Les valeurs des observations qui changent avec le temps peuvent être projetées sur l'axe temporel pour obtenir une représentation en polyligne.

Sur le plan modélisation, une approche de développement basée sur l'ontologie (*ontology-based development approach*) sera adoptée. L'intention est de concevoir une application générique dotée d'une riche infrastructure formelle. [73] avait introduit l'ontologie SNAP/SPAN pour modéliser les domaines spatiaux dynamiques. Les abstractions SNAP/SPAN offrent des riches concepts de haut niveau pour composer avec les propriétés statiques et changeantes des objets. Toutes les entités sont classifiées en classes *concepts* and individus *instances of classes*. Ainsi, les capteurs d'humidité sont une classe. Un capteur spécifique est un individu *instance*. Les individus sont classées en objets *SNAP ou endurants* et processus *SPAN ou perdurants*. Les endurants gardent leur identité durant leur cycle de vie. Les capteurs, le *router* du RCSF sont des exemples d'endurants. Les perdurants

révèlent eux-même par intermittence et par moment sur l'axe temporel. Tous les flots de données RCSF sont des perdurants. Chaque perdurant est dépendant d'un endurant. Les flots de données RCSF dépendent des capteurs.

Le diagramme de classes de l'ontologie est illustré dans figure 2.6

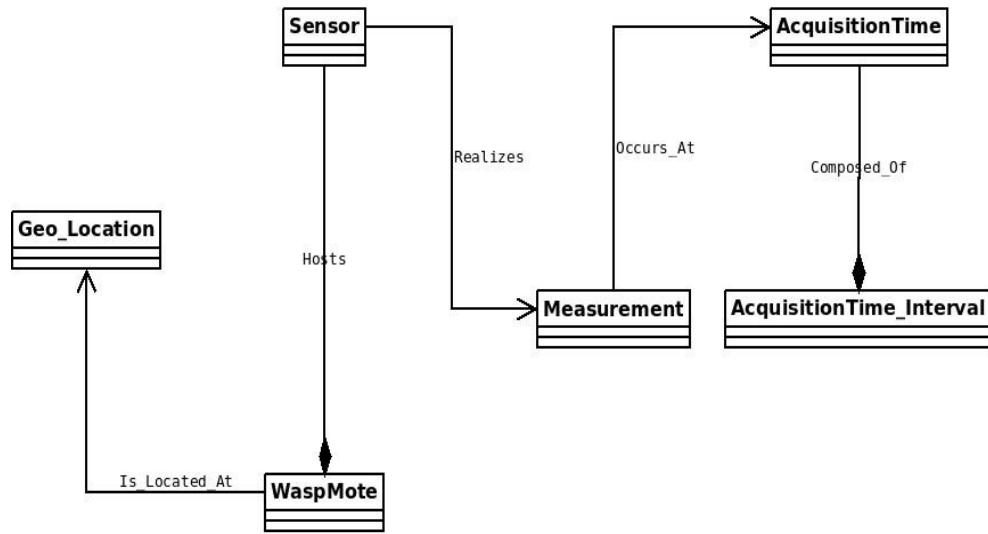


Figure 2.6: Diagramme de classe de l'ontologie SNAP/SPAN du RCSF

Selon les abstractions SNAP/SPAN, le modèle représente les principaux objets endurants (SNAP) à la gauche de la figure. L'entité pivot du modèle est le Sensor. Il est connecté à une carte *WaspMote* qui peut héberger plusieurs capteurs. Chaque *WaspMote* possède une localisation géographique représentée par GeoLocation. Cette localisation est renseignée par des coordonnées géographiques. Le côté droit de la figure représente les principaux objets perdurants (SPAN). Chaque capteur recueille les mesures à un temps représenté par AcquisitionTime. AcquisitionTime est un temps valide qui réfère au moment de l'obtention de la mesure ou du calcul de la valeur agrégée. L'acquisition des valeurs est aussi possible durant une période i.e. AcquisitionTimeInterval.

Les flots de données indiquent le temps de leur acquisition ce qui en fait des données temporelles. Cependant, les flots manquent des attributs spatiaux explicites. Pour des fins de conception, les capteurs hébergées par une *WaspMote* héritent sa position géographique obtenue par GPS. Quand le modèle ontologique est transformé en un modèle logique, la configuration 2.7 suivante est obtenue:

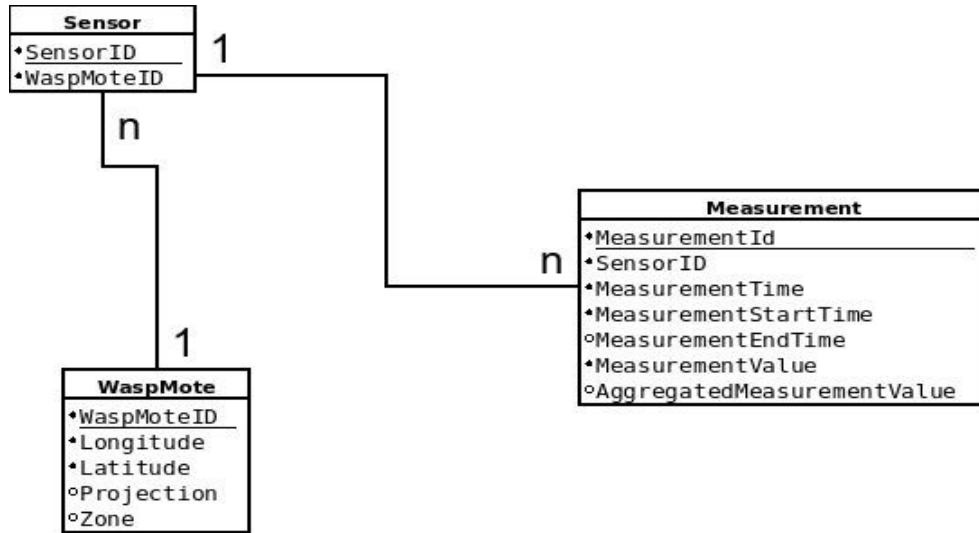


Figure 2.7: Modèle logique RCSF

Sensor, WaspMote et Measurement sont des relations. MeasurementTime, MeasurementStartTime, MeasurementEndTime sont des attributs temporels dans Measurement. Les coordonnées géographiques (Longitude, Latitude, Projection et Zone) sont des attributs spatiaux de WaspMote. Les relations sont un à plusieurs (1-M) entre Sensor et Measurement et entre Sensor et WaspMote. les flots de données RCSF de l'application sont taggés spatialement et temporellement. Pour des buts d'aisance et de richesse de manipulation, il est nécessaire d'utiliser un type abstrait de données (TAD). Le TAD va faciliter la formulation des requêtes en faisant appel aux opérateurs spatiaux et temporels. Comme WaspMote peut être considérée comme un point, les opérateurs vont être référencés à un point. Comme les capteurs sont spatialement fixes, les requêtes vont cibler uniquement les observations qui changent dans le temps.

Les ADT spatiaux disponibles offrent des bibliothèques normalisées pour manipuler les données spatiales. Ils sont chargés comme extensions aux SGBD. PostGIS<sup>®</sup> est l'extension spatiale du SGBD PostgreSQL<sup>®</sup> [149, 148]. Cependant, les bibliothèques temporelles ne sont pas normalisées et sont souvent ignorées par les développeurs.

#### 2.4.3.2 Modélisation mathématiques des observations RCSF.

L'approche de modélisation considère la mesure d'observation (Observation Measurement, OM) comme une composante atomique. Le temps valide est défini comme la ligne d'ancrage temporel. Le temps valide est associé à une OM quand l'observation est réalisé en temps réel. T est supposé être l'ensemble des instants temporels des observations et son produit cartésien est:

**Définition 1.**

$$T * T = T^2 \quad (2.1)$$

La fermeture de toutes les OM est définie par

**Définition 2.**

$$\bigcup_{i=1}^n O_i \subseteq T^2 \quad (2.2)$$

S est l'ensemble des OM faites par

**Définition 3.**

$$S \subset \bigcup_{i=1}^n O_i \subseteq T^2 \quad (2.3)$$

$S_i$  est le set des OM faites par le capteur i.

$S_i$  est un ensemble totalement ordonné (linéaire).

**Définition 4.**

$$\forall O_n \in S_i \mid t_i \subseteq T^2 < t_{i+1} \subseteq T^2 \quad (2.4)$$

$S_i$  is non-réflexif, non-symétrique and transitif.

Alors  $S_i$  dénote une chaine de OM réalisées comme le montre la figure 2.8.

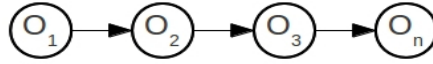


Figure 2.8: Chaîne d'observations

#### 2.4.3.3 Prédicats de l'ADT temporel.

Dans ses articles phares [8, 9], Allen propose les prédicats temporels. Ils furent implantés par des opérateurs temporels comme dans les travaux [60, 61, 63, 62]. Même si ces mises en œuvre touchent les trajectoires spatio-temporelles du comportement de transport, il est prévu de modifier le large ensemble d'opérateurs développés pour l'adapter aux besoins de l'application actuelle.

Les prédicats d'Allen utilisent des intervalles délimités par des instants temporels. Notre application se sert des simples instants temporels associées aux OM. Ceci signifie un TAD orienté instants temporels.

Le TAD ciblé est composé par d'opérateurs impliquant des instants temporels en rapport avec d'autres instants temporels et des intervalles temporels. Quelques prédicats temporels de ceux d'Allen sont dérivés comme le montre la table 2.1.

Représentation	Prédicats
$O_i$ equals $[q_1, q_2]$	$O_i = q_1 \cup O_i = q_2$
$O_i$ before $[q_1, q_2]$	$O_i < q_1$
$O_i$ meets $[q_1, q_2]$	$O_i = q_1$
$O_i$ overlaps $[q_1, q_2]$	$O_i \geq q_1 \cap O_i \leq q_2$
$O_i$ starts $[q_1, q_2]$	$O_i = q_1$
$O_i$ ends $[q_1, q_2]$	$O_i = q_2$
$O_i$ during $[q_1, q_2]$	$O_i \geq q_1 \cap O_i \leq q_2$

Tableau 2.1: Time Instant Predicates

Il existe quelques égalités entre les prédicats annoncés:

1. Le predicate *equals* est équivalent au prédicat *meets* ou au prédicat *ends*.
2. Le predicate *meets* est équivalent au prédicat *starts*.

3. Le predicate *overlaps* est équivalent au prédicat *during*.

Par conséquent, le prédicat *equals* est équivalent au prédicat *starts* ou au prédicat *ends*. Ces équivalences seront prises en considération par les techniques de surcharge des opérateurs lors des étapes d'optimisation du code implanté.

Un autre ensemble, déjà défini, concerne les instants temporels de l'OM et de la chaîne OM comme le montre la table 2.2

Opérateur	Cible	Retour
FirstOM()	OM Chain	First OM on the OM Chain <sup>1</sup>
LastOM()	OM Chain	Last OM on the OM chain
NextOM(OM <sub>i</sub> )	OM <sub>i</sub>	OM <sub>i</sub> + 1
PreviousOM(OM <sub>i</sub> )	OM <sub>i</sub>	OM <sub>i</sub> - 1 <sup>2</sup>
NthOM()	OM Chain	N <sup>th</sup> OM
BeforeOM(OM <sub>i</sub> )	OM Chain	OM before OM <sub>i</sub>
AfterOM(OM <sub>i</sub> )	OM Chain	OM after OM <sub>i</sub>
OM.equals(OM <sub>i</sub> )	OM <sub>i</sub>	OM <sub>i</sub> Equals OM <sub>j</sub>
OM.meets(starttime, endtime)	OM Chain	Boolean
OM.overlaps(starttime, endtime)	OM Chain	Boolean
OM@(Time t <sub>i</sub> )	OM Chain	OM at time t <sub>i</sub>
OM_Time(OM <sub>i</sub> )	OM	Time t <sub>i</sub> of OM <sub>i</sub>

Tableau 2.2: Liste élémentaire des opérateurs de instants temporels de l'OM et de la chaîne OM

À côté des opérateurs temporels, des opérateurs spatiaux sont définis comme l'illustre la table 2.3:

Opérateur	Cible	Retour
OM_SRS()	OM <sub>i</sub>	OM Spatial Reference System
LocateOM(Lat <sub>i</sub> , Long <sub>i</sub> )	OM Chain	OM <sub>i</sub>
WhereOM(OM <sub>i</sub> )	OM <sub>i</sub>	OM <sub>i</sub> geographic coordinates <sup>3</sup>

Tableau 2.3: Opérateurs spatiaux de OM

De plus, des opérateurs qui donnent une description statistique du phénomène sous observation sont définis comme l'affiche la table 2.4.

<sup>1</sup>If OMcount() is greater than 0.

<sup>2</sup>If Current OM position is greater than 1.

<sup>3</sup>Returns the sensor geographic location.

Opérateur	Cible	Retour
OM_Count()	OM Chain	Number of the OMs
OM_Value(OM <sub>i</sub> )	OM <sub>i</sub>	OM <sub>i</sub> measurement value
OM_ValueMedian()	OM Chain	OMs median value
OM_SDeviation()	OM Chain	OMs standard deviation
OM_MinValue()	OM Chain	OMs minimum value
OM_MaxValue()	OM Chain	OMs maximum value

Tableau 2.4: Opérateurs statistiques

La liste des opérateurs cités n'est pas exhaustive. Elle peut être enrichie durant le raffinement de l'analyse des besoins et surtout suite à l'implémentation du prototype de l'application.

## 2.4.4 Architecture, implementation et test.

### 2.4.4.1 Architecture de l'application.

Comme le montre la figure 2.9, les composantes du DSMS hybride sont:

- Un réseau de cinq nœuds agissant comme un SNPQ distribué. Chaque nœud collecte les observations et les transmet à son voisin le plus proche jusqu'au *router*.
- Le *router* dirige les observations vers les périphériques d'affichage ou de stockage.
- Un ensemble RAID de mémoire de masse sert au le stockage externe de gros volumes des flots de données.
- Une station de travail pour héberger les activités de surveillance et de requêtage. Les activités de requêtage temporel sont prises en charge par l'ADT temporel.

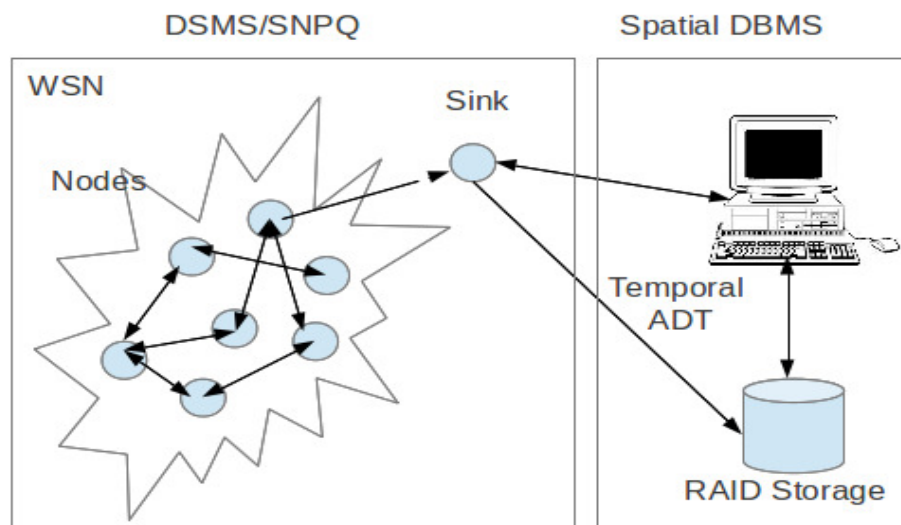


Figure 2.9: Architecture du DSMS spatio-temporel

#### 2.4.4.2 Implémentation.

Pour l'implémentation du DSMS spatio-temporel, quatre composantes logicielles sont utilisées:

- Le SNPQ comme gestionnaire du RCSF. TinyDB est la solution retenue afin d'éviter les problèmes de compatibilité avec TinyOS, le SE dédié au RCSF.
- PostgreSQL/PostGIS comme SGBD spatial. Le SNPQ sauvegarde les OM dans des tables créées dans la coquille PostgreSQL/PostGIS. PostgreSQL a la capacité de gérer des gros volumes de données.
- Un TAD temporel comme extension temporelle intégrée à PostgreSQL/PostGIS
- Une interface intégrée, servant à surveiller les activités SNPQ et à interroger les données en utilisant l'ADT.

Le DSMS hybride possède deux stratégies de stockage: 1) La stratégie originelle TinyDB qui sauvegarde les observations dans des lignes en servant de la lettre Q suffixée par un entier pour les identifier et les distinguer comme le montre la figure 2.10. Cette stratégie offre un ensemble limité de champs pour représenter les données d'observations. Il fut décidé d'ajouter 2) une seconde stratégie avec l'intention d'injecter plus de sémantique dans les données sauvegardées. En fait, le modèle logique de données déduit du modèle SNAP/SPAN de la figure 2.6 est à disposition.

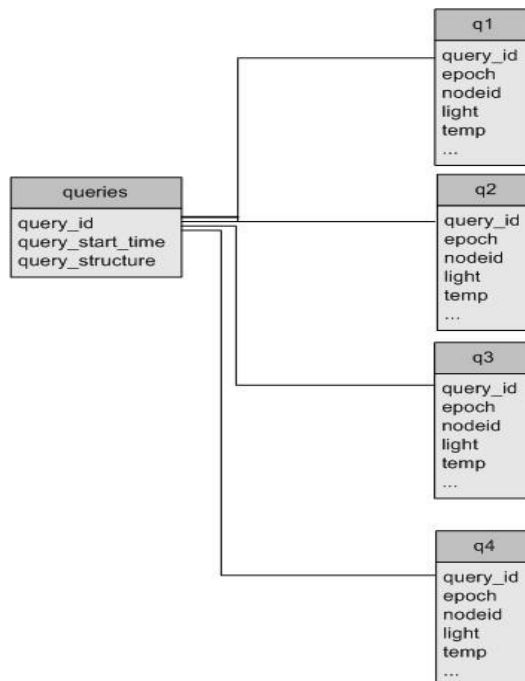
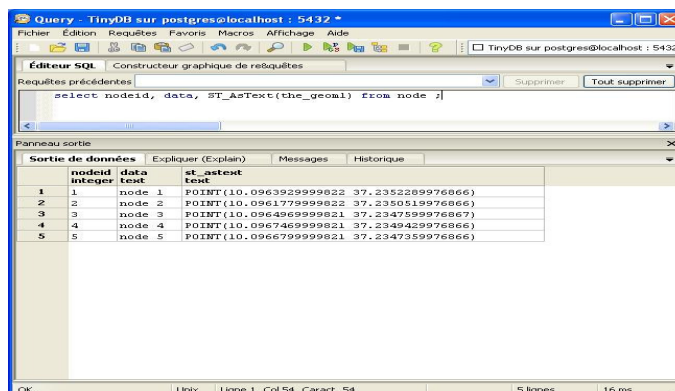


Figure 2.10: TinyDB: Sauvegarde des observations par requêtes

Afin d'éviter les coûts des opérations de jointure de table et afin de garder la sémantique des données dans une structure unique, les trois tables de la figure 2.7 furent fusionnées dans une seule table comparable à une *flat file*. Pour diriger les données vers la nouvelle table, le comportement original de TinyDB fut modifié. TinyDB possède un module écrit en Java qui dirige continuellement les données vers PostgreSQL/PostGIS. Il fut transformé pour qu'il dirige aussi les données vers la nouvelle table.

Par la suite, les opérateurs conçus pour le TAD temporel furent codés en fonctions pl/pgSQL, le SQL saveur PostgreSQL/PostGIS.

Dans le but de tester le prototype de l'application, les *motes* furent déployées dans un champ agricole au nord de Ras Jbel à l'est du village Beni Atta dans le Nord Tunisien. Les localisations des cinq motes sont affichées par la figure 2.11.



Query - TinyDB sur postgres@localhost : 5432

Éditeur SQL. Constructeur graphique de requêtes

Requêtes précédentes

select nodeid, data, ST\_AsText(the\_geom) from node z

Panneau sortie

Sortie de données	nodeid	data	st_astext
	integer	text	text
1	1	node 1	POINT(10.09639299999822 37.2352289976866)
2	2	node 2	POINT(10.09617799999822 37.2350519976866)
3	3	node 3	POINT(10.09649699999821 37.2347599976867)
4	4	node 4	POINT(10.09674699999821 37.2349429976866)
5	5	node 5	POINT(10.09667999999821 37.2347359976866)

OK. Unix Ligne 1, Col 54, Caract. 54 5 lignes. 16 ms

Figure 2.11: Localisation des motes

Les deux figures suivantes (avec un zoom simulé de gauche à droite) prises de Google Earth<sup>®</sup> affiche la localisation des motes. Chaque mote est dotée de deux capteurs: un pour la lumière (light) et l'autre pour la température (temp).



Figure 2.12: Nord de la Tunisie.

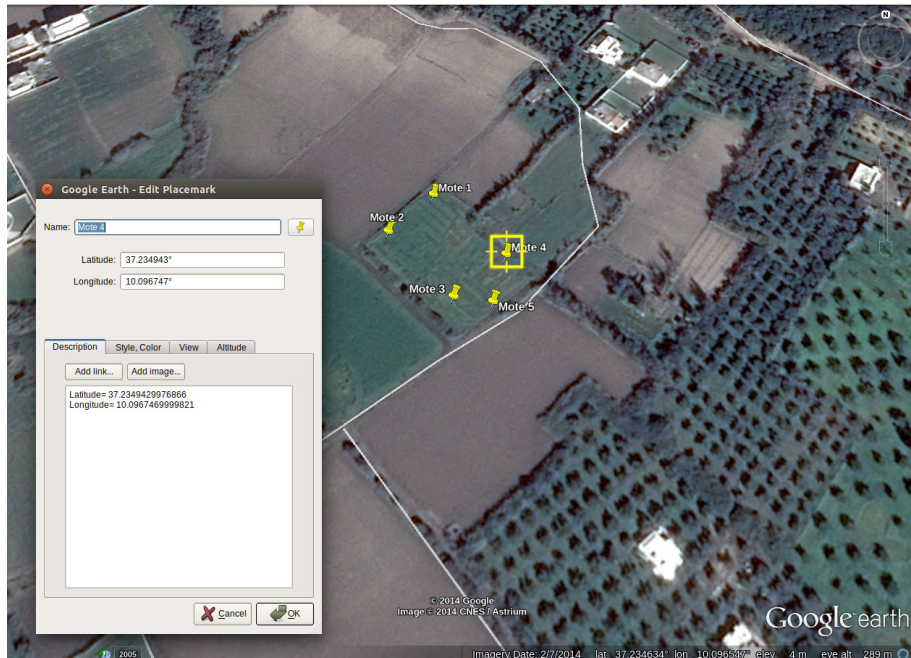


Figure 2.13: Motes déployées dans un champ agricole.

Les valeurs des observations doivent apparaître dans deux formes: la forme originale TinyDB et la forme de la nouvelle table. Les procédures d'interrogation de TinyDB est bien documentées dans la littérature. Dans les paragraphes suivants, des requêtes spatiales, temporelles et spatio-temporelles sont soumises à la nouvelle DB avec des exemples d'écrans de saisie.

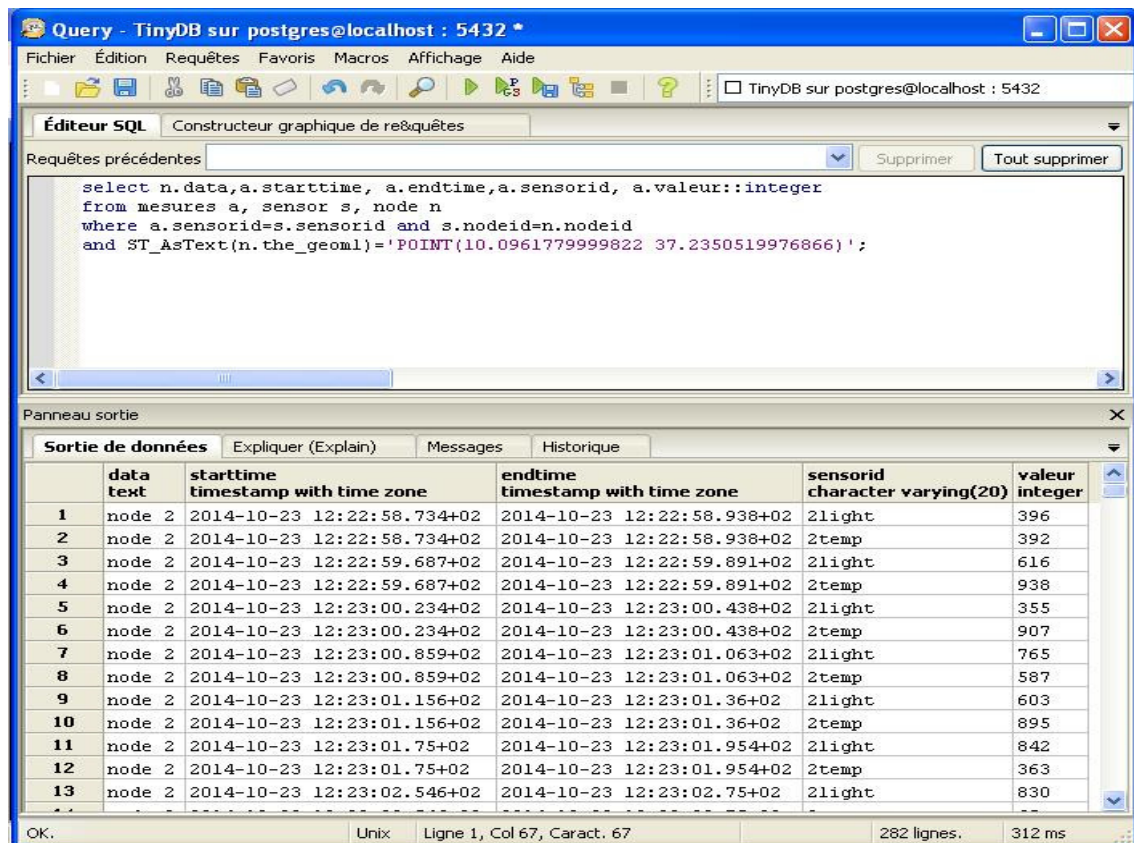


## 2.4.5 Requêtes Spatio-temporelles des données RCSF.

### 2.4.5.1 Requêtes spatiales.

La majorité des opérateurs spatiaux utilisés dans les requêtes sont intégrés dans l'extension PostGIS.

1) Quelles sont les valeurs de la température et de la lumière mesurées par la mote localisée aux coordonnées (10.0961779999822 37.2350519976866)?



The screenshot shows the TinyDB SQL editor interface. The SQL query is as follows:

```
select n.data,a.starttime, a.endtime,a.sensorid, a.valeur::integer
from mesures a, sensor s, node n
where a.sensorid=s.sensorid and s.nodeid=n.nodeid
and ST_AsText(n.the_geom1)='POINT(10.0961779999822 37.2350519976866)';
```

The results are displayed in the 'Sortie de données' panel, showing 13 rows of data. The status bar at the bottom indicates 'Ligne 1, Col 67, Caract. 67', '282 lignes.', and '312 ms'.

	data text	starttime timestamp with time zone	endtime timestamp with time zone	sensorid character varying(20)	valeur integer
1	node 2	2014-10-23 12:22:58.734+02	2014-10-23 12:22:58.938+02	2light	396
2	node 2	2014-10-23 12:22:58.734+02	2014-10-23 12:22:58.938+02	2temp	392
3	node 2	2014-10-23 12:22:59.687+02	2014-10-23 12:22:59.891+02	2light	616
4	node 2	2014-10-23 12:22:59.687+02	2014-10-23 12:22:59.891+02	2temp	938
5	node 2	2014-10-23 12:23:00.234+02	2014-10-23 12:23:00.438+02	2light	355
6	node 2	2014-10-23 12:23:00.234+02	2014-10-23 12:23:00.438+02	2temp	907
7	node 2	2014-10-23 12:23:00.859+02	2014-10-23 12:23:01.063+02	2light	765
8	node 2	2014-10-23 12:23:00.859+02	2014-10-23 12:23:01.063+02	2temp	587
9	node 2	2014-10-23 12:23:01.156+02	2014-10-23 12:23:01.36+02	2light	603
10	node 2	2014-10-23 12:23:01.156+02	2014-10-23 12:23:01.36+02	2temp	895
11	node 2	2014-10-23 12:23:01.75+02	2014-10-23 12:23:01.954+02	2light	842
12	node 2	2014-10-23 12:23:01.75+02	2014-10-23 12:23:01.954+02	2temp	363
13	node 2	2014-10-23 12:23:02.546+02	2014-10-23 12:23:02.75+02	2light	830

Figure 2.14: Requête Spatiale 1

Le requête permet de chercher les observations mesurée par une moté précisément localisée.

2) Quelle est la mote la plus proche de la mote actuelle?

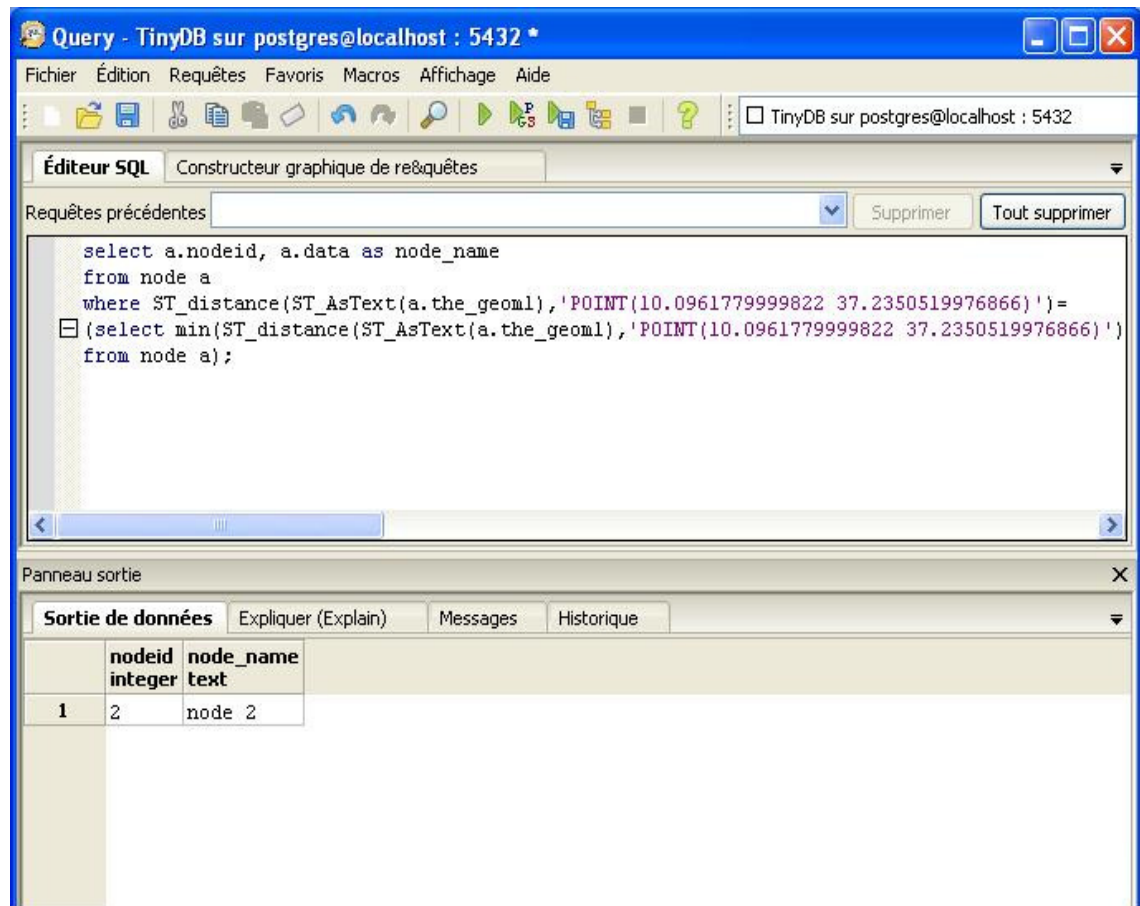


Figure 2.15: Requête Spatiale 2.

Cette requête fait appel à la fonction spatiale classique qui trouve le mote le plus proche de l'actuelle.

#### 2.4.5.2 Requêtes temporelles.

La dimension temporelle est une des dimensions le plus importante des données mais continue à être ignorée. Elle sert à repérer des observations sur la base d'une valeur spécifique. le TAD temporel développé a l'intention de combler cette lacune et de permettre d'interroger les données sauvegardées sur la base de leur dimension temporelle.

1) Quelles sont les valeurs de la température et de la lumière durant la période commençant de  $t_1$  et finissant à  $t_2$ ?

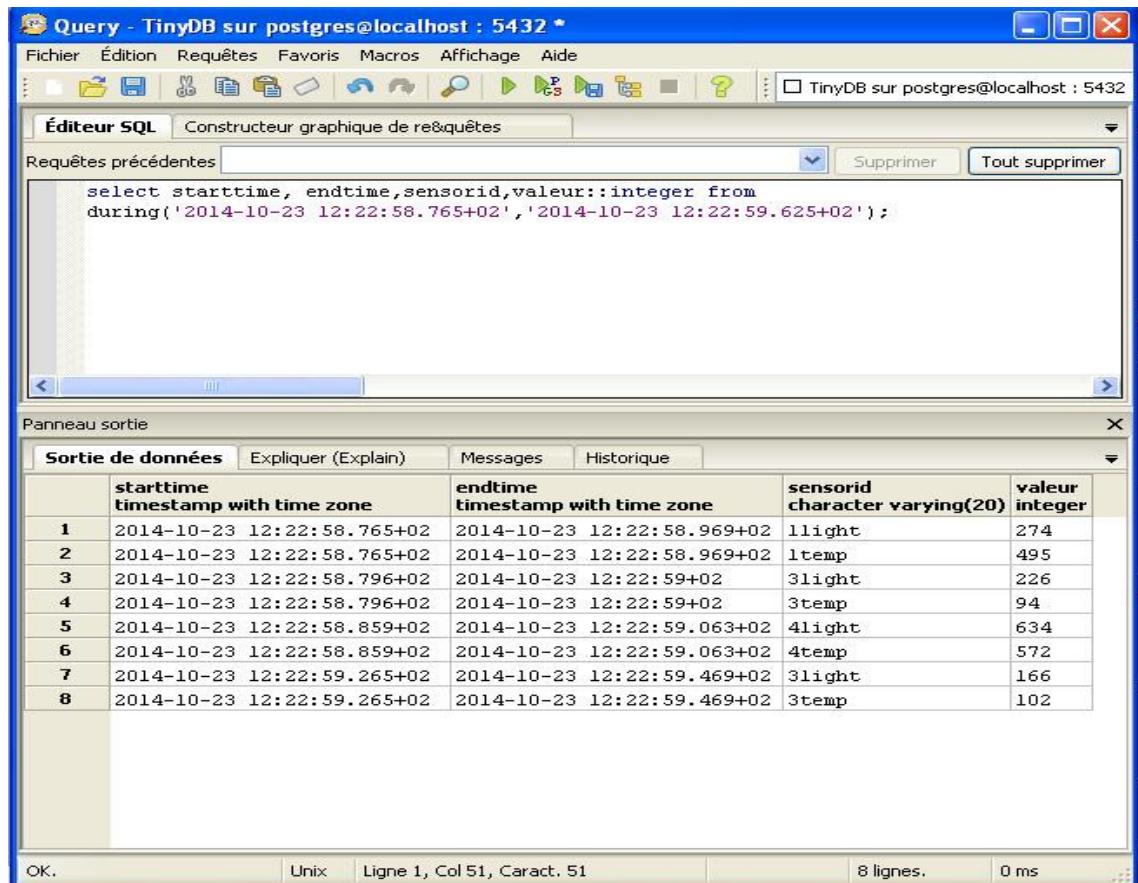


Figure 2.16: Requête Temporelle 1.

Cette requête utilise l'opérateur *during* défini et implémenté pour le TAD. Il permet de retrouver les observations obtenues la période allant d'un temps de début à un temps de fin.

2) Dans quel temps, les valeurs de la température et de la lumière sont équivalents à  $v$

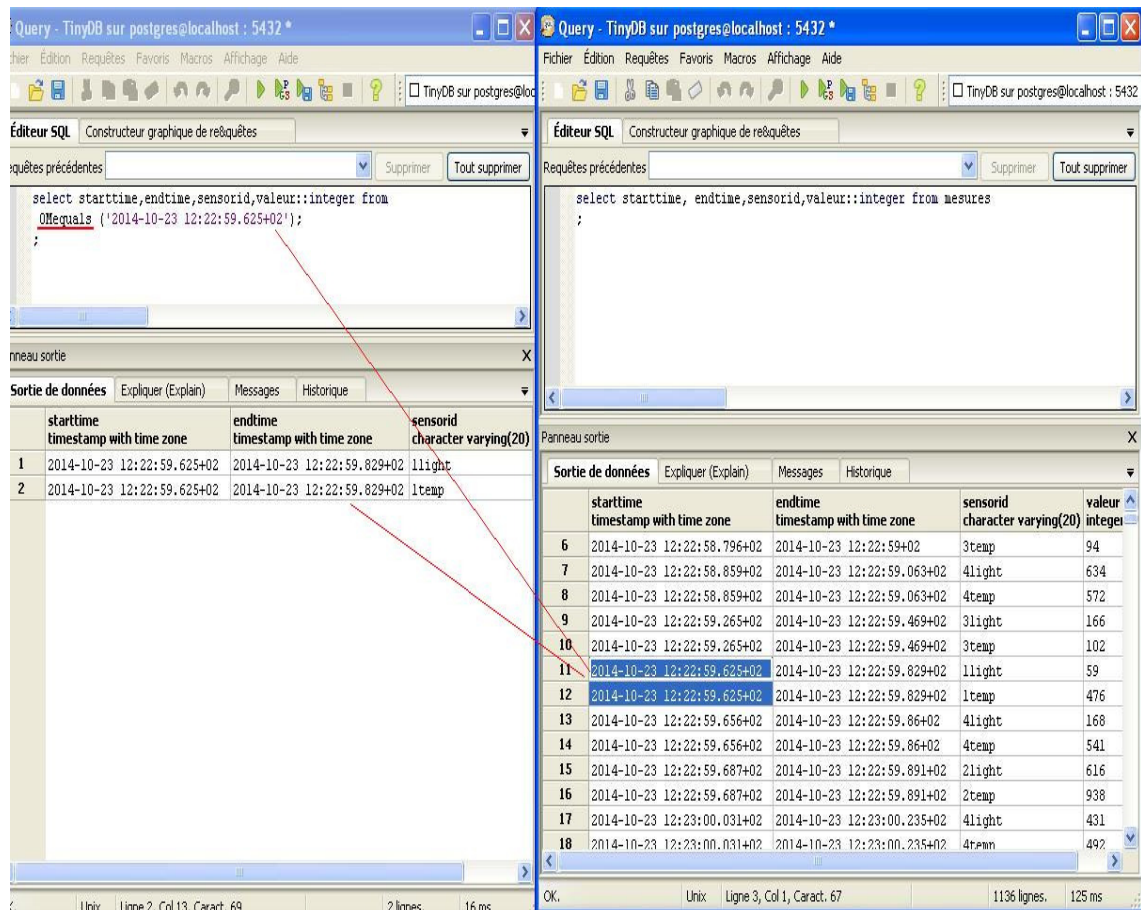


Figure 2.17: Requête Temporelle 2.

L'opérateur temporel *OM\_equals()* est utilisé pour comparer une valeur spécifique avec une déjà mesurée.

3)Étant donné une observation, quelle est la valeur de prochaine sur la chaine?

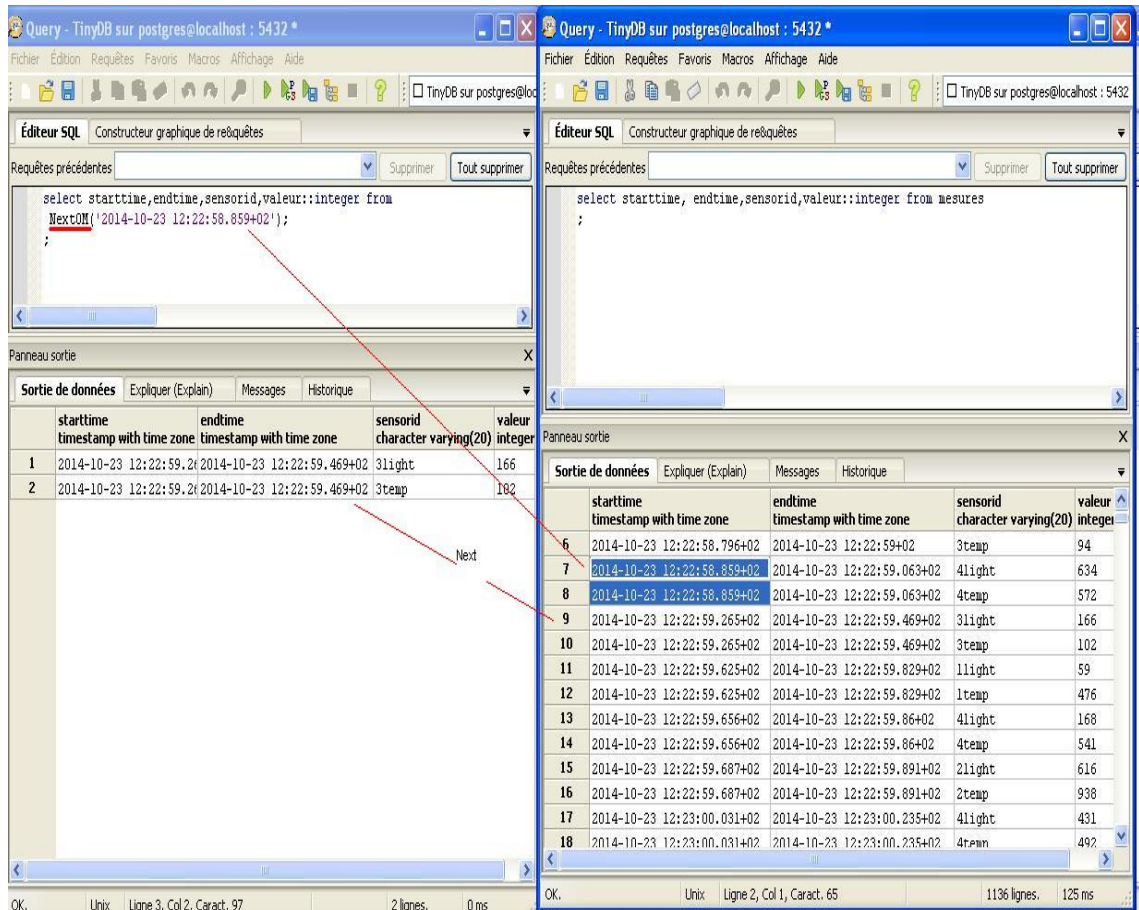


Figure 2.18: Requête Temporelle 3.

l'opérateur *nextOM()* est défini pour le TAD Temporel. Il interroge la chaîne des observations dont l'ordre d'organisation est séquentiel temporel.

### 2.4.5.3 Requêtes spatio-temporelles.

Ce service est implémenté pour la première fois dans le contexte de DSMS et du RCSF. En combinant les opérateurs spatiaux et temporels, il est possible de formuler des requêtes spatio-temporelles. la structure interne de la nouvelle table autorise l'exploitation de l'axe temporel comme défini par les champs i.e. *start\_time* and *end\_time*.

- 1) Étant donné une localisation et durant une période  $(t_1, t_2)$ , trouver la valeur de la lumière?



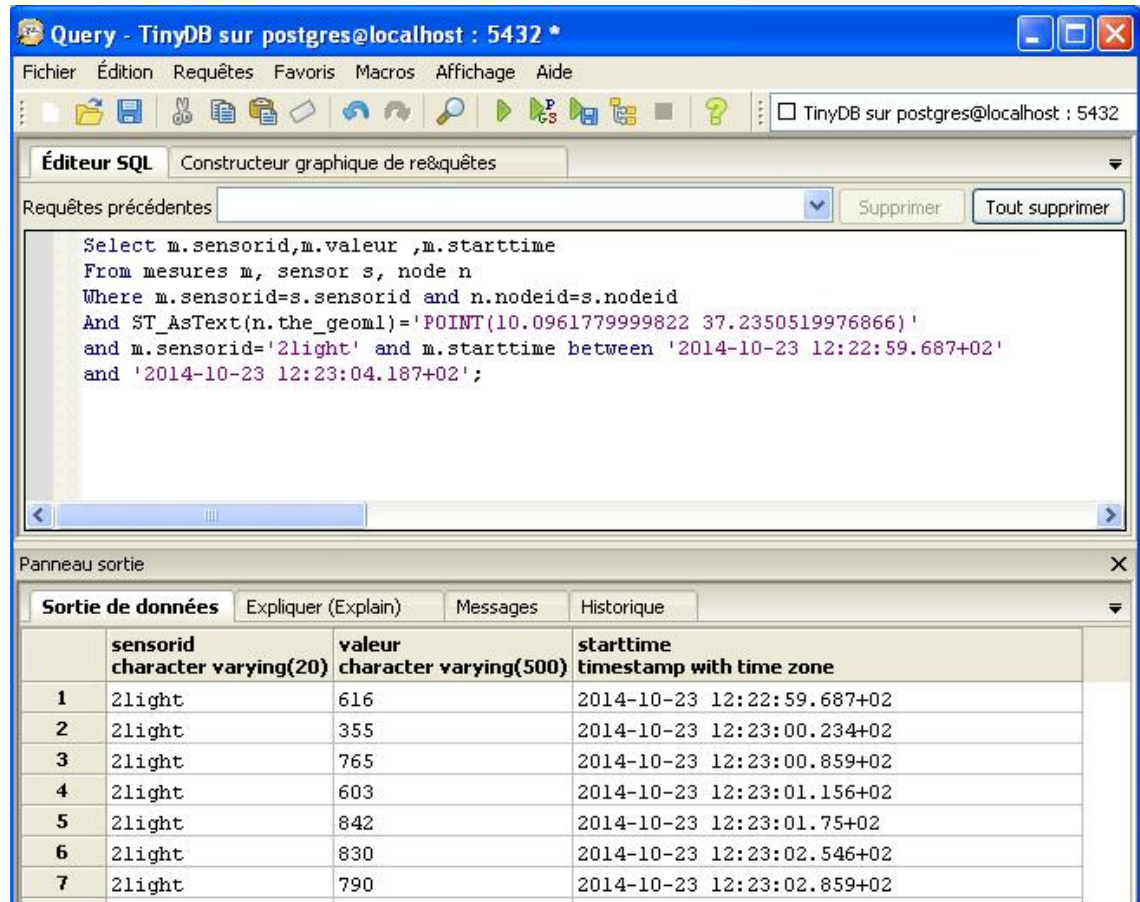


Figure 2.19: Requête Spatio-Temporelle 1.

Cette requête combine le paramètre de localisation avec l'opérateur *during* pour chercher les valeurs de la lumière.

2) Pour une valeur supérieure à une valeur donnée, trouver le temps et la localisation et les observations.

The screenshot shows the TinyDB application window titled "Query - TinyDB sur postgres@localhost : 5432 \*". The interface includes a menu bar (Fichier, Édition, Requêtes, Favoris, Macros, Affichage, Aide) and a toolbar. The "Éditeur SQL" tab is active, displaying the following query:

```
Select (m.valeur::integer) as valeur_light ,ST_AsText(n.the_geom1) as Localisation_GPS , m.starttime
From mesures m, sensor s, node n
Where m.sensorid=s.sensorid and n.nodeid=s.nodeid
and m.sensorid like '%light' and m.valeur::integer>200;
```

Below the query editor is the "Panneau sortie" (Output Panel) with tabs for "Sortie de données", "Expliquer (Explain)", "Messages", and "Historique". The "Sortie de données" tab is selected, showing a table with 11 rows of results.

	valeur_light integer	localisation_gps text	starttime timestamp with time zone
1	396	POINT(10.0961779999822 37.2350519976866)	2014-10-23 12:22:58.734+02
2	274	POINT(10.0963929999822 37.2352289976866)	2014-10-23 12:22:58.765+02
3	226	POINT(10.0964969999821 37.2347599976867)	2014-10-23 12:22:58.796+02
4	634	POINT(10.0967469999821 37.2349429976866)	2014-10-23 12:22:58.859+02
5	616	POINT(10.0961779999822 37.2350519976866)	2014-10-23 12:22:59.687+02
6	431	POINT(10.0967469999821 37.2349429976866)	2014-10-23 12:23:00.031+02
7	858	POINT(10.0964969999821 37.2347599976867)	2014-10-23 12:23:00.062+02
8	355	POINT(10.0961779999822 37.2350519976866)	2014-10-23 12:23:00.234+02
9	799	POINT(10.0963929999822 37.2352289976866)	2014-10-23 12:23:00.265+02
10	748	POINT(10.0963929999822 37.2352289976866)	2014-10-23 12:23:00.703+02
11	541	POINT(10.0967469999821 37.2349429976866)	2014-10-23 12:23:00.796+02

Figure 2.20: Requête Spatio-Temporelle 2.

Cette requête possède une valeur d'observation. Son but est de retrouver où et quand elle fut mesurée.

3) Pour une localisation donnée et durant la période  $(t_1, t_2)$ , quelle la moyenne de la lumière?

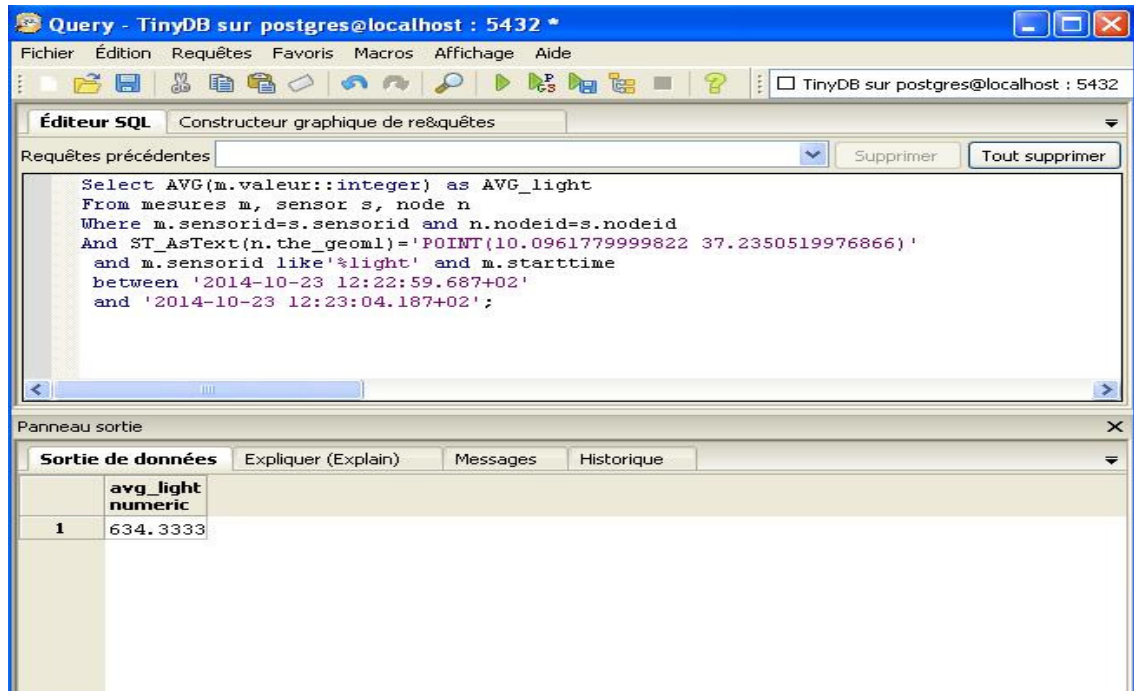


Figure 2.21: Requête Spatio-Temporelle 3.

Pour une valeur connue, la requête cherche une moyenne statistique dérivée des données archivées.

## 2.5 Conclusion

Le RCSF produit des gros volumes de flot de données. Le RCSF standard ne prend en charge d'en mémoriser qu'une partie. Des données pertinentes sont perdues en dépit de leur valeur historique certaine. Dans cette recherche, une modélisation spatio-temporelle pour une application DSMS hybride fut proposée. La BD développée garde l'approche classique du SNQP dans la gestion des données mais propose une solution pratique pour le stockage des données avec leurs dimensions spatiales et temporelles. La BD est renforcée par une TAD temporel qui permet les requêtes spatiale, temporelles et spatio-temporelles dans le but d'exploiter la sémantique inhérente aux données. Des définitions formelles des opérateurs du TAD sont proposées. Un prototype *proof-of-concept* est conçu et implémenté dans la coquille SGBD PostgreSQL/PostGIS. Des requêtes sont soumises au prototype et les résultats sont montrés par des écran de saisies témoins. Les prochaines étapes seraient 1) le développement d'une interface unifiée aidant la formulation des requêtes et le choix de stratégie de visualisation et 2) explorer l'opportunité de l'intégration du type abstrait de données spatio-temporel comme extension à la plateforme *STREAM*, *GigaScope* ou *TelegraphCQ*.



# Chapitre 3

## Modélisation 3D des données géographiques

### Sommaire

<b>3.1 Outils de modélisations 3D . . . . .</b>	<b>68</b>
3.1.1 Normes et formats . . . . .	68
3.1.2 Stockage de CityGML . . . . .	72
<b>3.2 Modélisation de la Médina . . . . .</b>	<b>74</b>
<b>3.3 Application Médina 3D . . . . .</b>	<b>75</b>
<b>3.4 Conclusion . . . . .</b>	<b>78</b>

### Introduction.

La Médina de Tunis est considérée comme patrimoine mondial d'après le classement par l'UNESCO depuis 1979. La Médina a vécu une succession de règnes comme ceux des Aghlabides, des Fatimides et des Hafsides. Chacune de ces époques a laissé sa trace dans le tissu urbain et l'architecture de la ville. La période qui a suivi 1956 reste la plus critique et la plus influente sur le tissu urbain vu les orientations idéologiques du pouvoir politique. En effet, la Médina a subi diverses transformations qui se sont traduites par une urbanisation incohérente et une détérioration avancée des bâtiments. Aujourd'hui, la ville figure parmi les zones urbaines où se croisent les flux des exodes migratoires, la densification de l'habitat des exclus, la paupérisation et la dégradation accélérée du capital architectural.

Face à la dégradation, une prise de conscience commence à se dessiner. L'association de Sauvegarde de la Médina, *ASM*, fut créée avec comme objectif principal la restauration des bâtiments historiques et la sensibilisation aux dangers qui menacent le patrimoine. D'autre part, l'Institut National de Patrimoine, *INP* lutte contre la détérioration du paysage en pilotant des projets de restauration des quartiers comme celui de Tourbet El Bèchia.

Mais en dépit des efforts déployés, la situation demeure précaire et peut dégénérer irrémédiablement. Pour pallier au pire, une sauvegarde par une représentation numérique tri-dimensionnelle (3D) réaliste rendant compte des informations historique, spatiales, géométriques, architecturales, esthétiques,

fonctionnelles et sociales serait une solution intermédiaire avant de concevoir et de mettre en œuvre une stratégie de restauration et de réhabilitation du patrimoine. Telle représentation serait le résultat de l'application des technologies de l'information et servirait comme référence crédible pour tout projet de rénovation ou de reconstruction des édifices de la Médina.

Dans ce cadre, une recherche de niveau Master que j'ai encadrée a été lancée afin de répondre à des questions scientifiques dont:

- Comment représenter et visualiser l'image 3D de la Médina?
- Quels niveaux de détails viser et quels outils pour un affichage dynamique?
- Comment s'assurer que la représentation 3D rendrait avec fidélité les caractéristiques de l'architecture et de l'esthétique des édifices?

Les objectifs de la recherche seraient:

- Utiliser CityGML pour la modélisation et la création des scènes 3D
- Ancrer la modélisation dans un cadre cartographique standard
- Injecter la dimension temporelle dans la modélisation pour rendre compte de la dynamique

Le Master fut soutenu avec succès en 2013 [120]. Dans les paragraphes suivants, l'essentiel de la revue de littérature des outils de modélisations 3D. Par la suite, le prototype *proof-of-the-concept* développé comme modèle historique 3D de la Médina avec des interrogations temporelles sera exposé.

## 3.1 Outils de modélisations 3D

De tradition, la modélisation de l'espace urbain est rendu possible grâce à l'utilisation des outils cartographiques intégrés aux Systèmes d'Information Géographique (SIG) basés sur une représentation bi-dimensionnel (2D) de l'espace [34]. Une panoplie de logiciels, des méthodes d'acquisition de données, des outils de visualisation et des standards ont permis l'émergence et le déploiement de représentation urbaine et des SIG tri-dimensionnels (3D).

Au début, les différentes normes utiles pour la mise en place d'un SIG 3D seront présentées. Par la suite, les formats de modélisation d'un SIG 3D seront évoqués. En dernier lieu, il sera question de la relation entre le modèle 3D de la Médina et les bases données spatiales afin d'offrir des interrogations temporelles.

### 3.1.1 Normes et formats

Le passage vers une représentation 3D dans un SIG se fonde sur un ensemble de normes et de structures de données capables de gérer explicitement les objets volumiques. Ces normes qui déterminent les méthodes, les outils et les services qui facilitent la manipulation de l'information géographique, sont publiées par deux organismes internationaux:

- 1 – **Organisation Internationale de Normalisation**[95]. Elle a proposé deux normes dédiées aux données géographiques:

- **La norme TC 211** dont le but est de définir les schémas spatiaux. Le TC 211 sert à établir un ensemble de normes structurées relatives à l'information sur les objets ou les phénomènes directement ou indirectement associés à une localisation dans l'espace géographique.

- **La norme ISO 19107** qui inclut l'ensemble de schémas permettant la description et la manipulation des caractéristiques spatiales d'un phénomène géographique en 3D. Chaque propriété spatiale d'un objet est décrite par un ou plusieurs attributs.

2 – **L'Open Geospatial Consortium (OGC)** [134]. Il a pour rôle de proposer des normes d'intégration et d'interopérabilité des données géospatiales entre les produits logiciels SIG. Deux standards sont les plus utilisés:

- **WMS (Web Map Service)**. Ce standard assure la production dynamique des cartes en exploitant les données géoréférencées des serveurs Web spatiaux.
- **WFS (Web Features Service)**. Ce standard réfère à l'ensemble des protocoles qui permettent l'accès aux objets et leurs attributs.

Mis à part les normes facilitant la mise au point d'outils de modélisation 3D, des formats sont proposées pour la description des données dans le cadre d'une représentation volumique dont:

**AutoCAD DXF3D** . Le DXF (Drawing Exchange Format) est un format d'export AutoCAD® de la compagnie Autodesk. Il permet d'échanger des fichiers de dessins assistés par ordinateur (DAO), et des fichiers conception assistée par ordinateur (CAO). DXF3D sert pour représenter les modèles 3D créés par AutoCAD. Il inclut de l'information pour la visualisation des données graphiques. Considérée comme norme *de facto*, il est supporté par presque tous les logiciels graphiques. Les modèles fournis par cet outil ne sont pas vraiment des modèles 3D. Il s'agit plutôt de 2,5D que de 3D.

**Industry Foundation Classes: IFC**. IFC ou *Information For Construction*, est un format de fichier qui assure l'échange de données pour les bâtiments. Ce format facilite le partage, l'échange des informations entre les logiciels utilisés par les professionnels de la construction, comme les architectes et les bureaux d'études. [53].

Parmi les fonctions fournies par IFC:

- La description des objets utilisés pour concevoir un bâtiment selon différents points de vue, comme l'architecture, la structure, etc.
- La description sémantique et géométrique des bâtiments ou des objets relatifs aux bâtiments.
- La description des relations entre les objets.

Dédié à la construction d'édifices, l'IFC fournit une représentation 3D détaillée des différents éléments composant un bâtiment comme les murs, les portes. Côté modélisation urbaine 3D, il se limite à une description simple du paysage.

**Collaborative Design Activity: Collada**. Le Collada est un langage qui assure la description et l'échange de données pour les applications 3D interactives (jeux). Il fournit un standard de schéma XML pour représenter des objets 3D en utilisant les polygones, les textures et quelques animations [14]. Il permet une modélisation en 3D des objets géographiques en évacuant leurs coordonnées et propriétés topologiques et géométriques. Ce qui constitue un obstacle à son adoption pour la modélisation urbaine 3D.

**Le format eXtensible Markup Language XML .** XML est un langage de description de données conçu pour faciliter le partage d'informations sur internet. XML utilise des balises afin de définir la structure et le contenu d'un fichier. Il permet également de décrire d'autres langages en définissant de nouvelles balises. Ultimement, un fichier XML peut être considéré comme une base de données.

**Geography Markup Language: GML.** Basé sur XML, GML est un langage spécifié par l'OGC [134]. Il est utilisé pour l'échange et le transfert de données géographiques, en incluant les propriétés spatiales et non spatiales des entités géographiques. En fait, GML étend XML sur plusieurs points:

- ▶ Fournir un moyen pour sauvegarder l'information spatiale.
- ▶ Permettre un codage efficace des géométries géospatiales comme la compression des données.
- ▶ Séparer les contenus spatiaux et non spatiaux de la représentation (graphique ou autre) des données.
- ▶ Permettre l'interopérabilité entre les bases de données géographiques.

GML est en constante évolution. Actuellement, il existe le GML3 et prochainement le GML4.

**Keyhole Markup Language: KML.** KML (ou KMZ en version compressée) est un langage basé sur XML, utilisé pour représenter des informations géographiques. Propriété de la compagnie Google, KML est utilisé par les logiciels Google Earth ou Google Maps, pour interroger et afficher les objets spatiaux.

Ce langage intègre des éléments de Collada pour la modélisation et le stockage des caractéristiques géographiques des objets du monde réel, en utilisant des primitives géométriques, e.g. les polygones, les modèles 3D et les images.

Pour le positionnement géographique, KML utilise le système de coordonnées en 3D (longitude, latitude et altitude).

**City Geography Markup Language: CityGML.** CityGML est une norme 3D géoréférencée pour la modélisation urbaine en 3D. Elle est développée en 2002 par une équipe menée par T. Kolbe [106], dans le cadre de l'initiative allemande "Geodata Infrastructure North-Rhine Westphalia". C'est équipe qui vise à mettre au point un modèle 3D interopérable. Depuis 2008, CityGML est considéré comme un standard open source soutenu par *OGC*. Il est défini comme un schéma d'application de GML 3.1.1. Il permet de stocker et échanger les modèles virtuels 3D urbain. Ce format, autorise la définition des relations entre les objets géographiques 3D partant de leurs propriétés sémantiques, géométriques, topologiques et d'apparence.

Un exemple d'un modèle urbain avec CityGML dans la figure (3.1)

CityGML représente les environnements urbains avec différents niveaux d'échelle allant d'une maquette numérique de terrain jusqu'aux détails internes d'un bâtiment. C'est la modélisation multi-échelles par niveau de détails, *Level of Details*, *LOD*.

CityGML supporte cinq niveaux de détails LOD, compris entre  $LOD_0$  et  $LOD_4$ . Le LOD indique l'échelle de précision avec laquelle sont représentées les différentes caractéristiques du modèle. Les



Figure 3.1: Modélisation 3D avec CityGML[120].

différents niveaux facilitent la visualisation et l'analyse de données sachant qu'un objet peut être représenté dans différents LOD en parallèle. Ainsi le même objet peut exister selon même objet selon différents degrés de résolution. Chaque LOD fournirait des éléments visuels différents:

- $LOD_0$ : Ce niveau de détail correspond à l'échelle de la région, où l'environnement urbain est décrit par un modèle numérique de terrain sur lequel une photo aérienne ou satellitaire ou une carte peut être drapée.
- $LOD_1$ : Pour ce niveau de détail, les objets caractéristiques d'une ville sont modélisés sous forme de bloc, alors que les façades ne sont pas texturées, et toutes les toitures sont plates. La précision est de l'ordre de 5 mètres.
- $LOD_2$ : Ce niveau donne un aperçu des grandes structures, par exemple, les bâtiments possèdent une toiture avec une forme. La précision est de 2 mètres.
- $LOD_3$ : Ce niveau décrit les structures des toits, les apparences extérieures sont présentes e.g. les fenêtres, les portes, les escaliers extérieures, les cheminées. La précision des objets est de l'ordre de 50 centimètres.
- $LOD_4$ : Ce niveau ajoute les détails des structures intérieures au niveau 3 e.g. les portes intérieures, le sol, le plafond, les escaliers, et éventuellement les meubles.

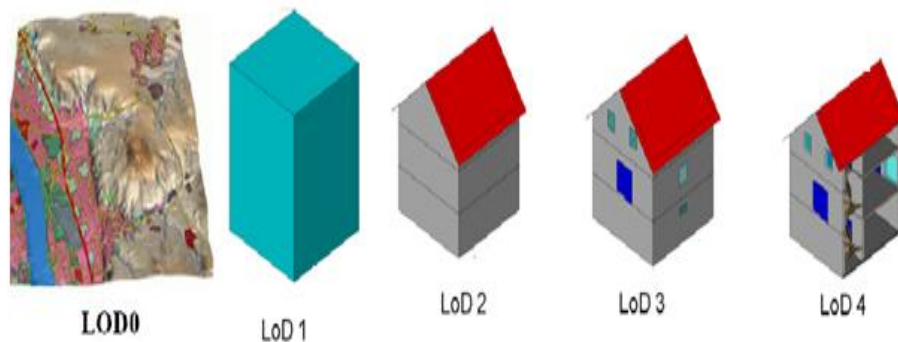


Figure 3.2: Les différents LOD d'un bâtiment CityGML.

La figure (3.2) est une modélisation d'un bâtiment selon les cinq niveaux de détails. Une vue globale de la maison est donnée par le  $LOD_1$ , les toits et les murs générés par le  $LOD_2$ , les portes et les fenêtres ne sont vues qu'à partir d'une modélisation en  $LOD_3$  et la structure interne de la maison appartient à  $LOD_4$ .

Finalement, le tableau (3.3) compare les différentes techniques de modélisation 3D d'un espace géographique.

Standard Capacité	KML	COLLADA	IFC	CITYGML
Géométrie	Support de niveau basique	Support nominal	support exhaustif	Support nominal
Topologie	Non supporté	Support de niveau basique	Support nominal	Support nominal
Sémantique	Non supporté	Non supporté	Support exhaustif	Support exhaustif
Géo-référencement	Support nominal	Non supporté	Support nominal	Support exhaustif
Apparence (textures)	Support de niveau basique	Support exhaustif	Support de niveau basique	Support nominal

Figure 3.3: La comparaison entre des standards de représentation urbaine 3D.[120]

### 3.1.2 Stockage de CityGML

Le choix de CityGML étant évident, il faut considérer le dernier objectif de la recherche i.e. le stockage du modèle dans un SGBD et l'interrogation des données via des requêtes SQL. À ce titre, les données temporelles et sémantiques qui retracent la dynamique urbaine et architecturale sont particulièrement ciblées.

Le transfert d'un modèle CityGML dans un SGBD n'est pas une mince affaire et ce vu la complexité du modèle de point de vue attributs thématiques et d'apparence, résolution multi-échelle, géométrie tri-dimensionnelle composite et coordonnées géographiques associées à un système de référence spatiale. Il faudrait alors choisir une coquille SGBD riche en fonctionnalités pour prendre en charge cette complexité structurelle. Après une comparaison entre SGBD, le choix fut PostgreSQL/Postgis. Après la choix de la coquille SGBD, il fallait choisir un outil d'affichage 3D d'entités géospatiales. Quelques logiciels de visualisation des modèles CityGML 3D commencent à apparaître sur le marché. On peut citer:

- *LandXplorer* [112] est un ensemble des packages d'applications permettant le chargement d'une manière efficace, et la modification des modèles de ville en 3D basés sur CityGML.
- *Elyx 3D* [44] qui accède directement à la base de données 2D et même 3D, c'est qui rend l'affichage dynamique du contenu possible.

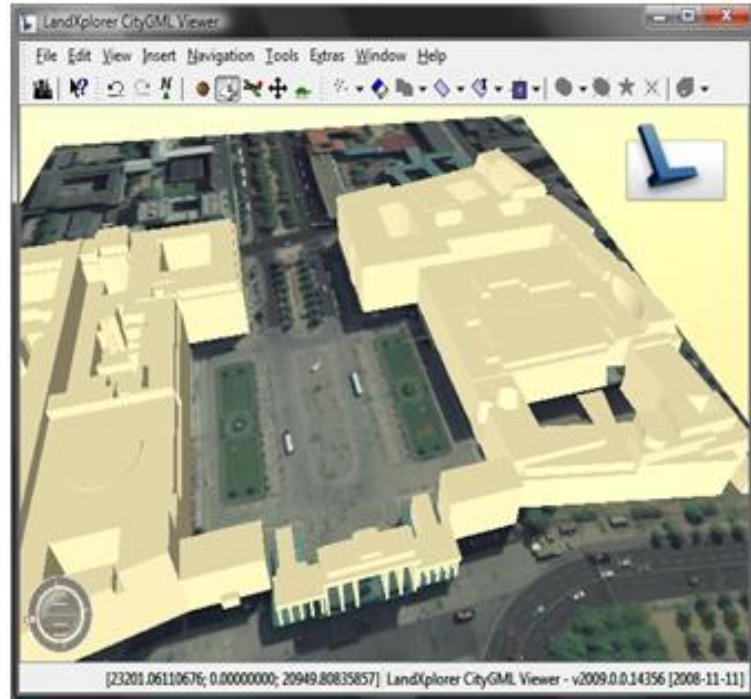


Figure 3.4: Berlin Pariser Platz visualisée par LandXplorer.

Elyx 3D assure la visualisation, l'édition, le requêtage, la sélection, les thématiques, des données géographiques étendues aux spécificités de la 3D. Plus que la lecture des formats de données vectorielles 2D comme shp et dxf. Elyx 3D offre la possibilité de lire les fichiers CityGML, et il peut gérer les différents LOD d'une manière dynamique.

- *Aristoteles* [11] est un logiciel de visualisation 3D. Ce logiciel utilise l'API Java3D pour afficher plusieurs fichiers CityGML simultanément. Il est capable de visualiser n'importe quel fichier conforme à la norme GML3.X.

La figure (3.5) montre cette fonctionnalité.

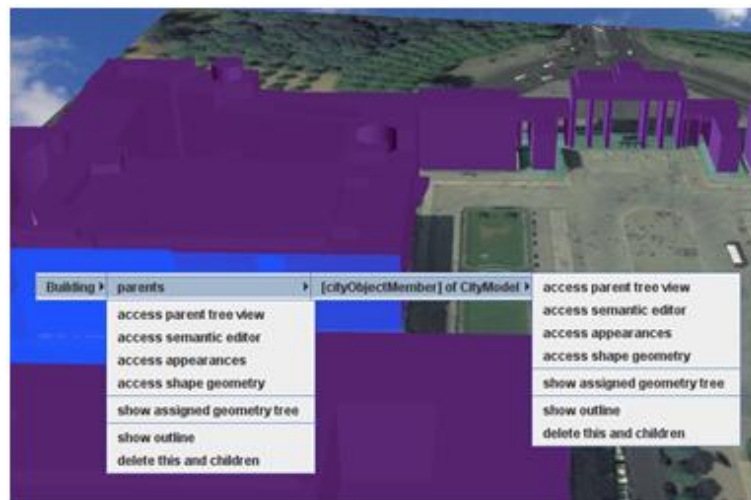


Figure 3.5: Berlin Pariser Platz visualisée avec Aristoteles.

- *3DGIS Cityvu* [2] est un logiciel libre capable de charger les formats de données CityGML à par-



tir de n'importe quelle source de données compatibles. Cityvu fournit un système de navigation complet afin d'assurer une navigation automatique dans une scène graphique.

L'architecture interne du Cityvu a été conçue pour supporter d'autres formats 3D comme 3D Studio Max, COLLADA par le chargement des plugins correspondants. Une interface de *3D GIS Cityvu* est affichée dans la figure (3.6).

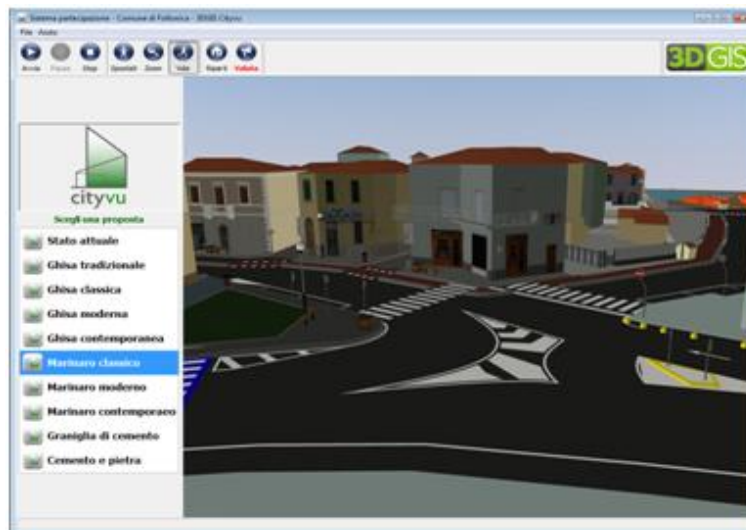


Figure 3.6: Scène visualisée par 3D GIS Cityvu.

Plutôt expérimentaux, ces logiciels ne possèdent pas la maturité ni l'envergure qui autorisent la gestion des données spatiales comme le font les systèmes d'information géographique. Le logiciel *gvSIG* [83] est parmi les rares authentiquement SIG qui permet de visualiser un modèle CityGML 3D et ce grâce à une plug-in 3D. Mais à part la visualisation qui somme toute reste rudimentaire, *gvSIG* ne permet pas d'accéder aux attributs des entités décrites dans le modèle qu'il affiche.

## 3.2 Modélisation de la Médina

La modélisation 3D de la Médina<sup>1</sup> (qui n'est en fait qu'un SIG 3D) doit obligatoirement passer par un SIG 2D. À la base, il faut alors une base cartographique de la Médina qui doit être chargée par le logiciel *gvSIG*. La figure (3.7) illustre les deux cartes qui furent utilisées.

Le processus de passage 2D vers 3D est illustré par la figure 3.8. Ce sont les différentes étapes de la transformation d'un fichier de type *shapefile* d'ESRI<sup>®</sup> [49] en un format CityGML 3D. Il y a eu transformation des polygones de la carte de format *shapefile* en un format KML. Le format KML est reconnaissable par le logiciel *Google SketchUp*<sup>®</sup> [168] qui sera utilisé pour la modélisation 3D volumique.

Dès que les polygones sont importés dans *SketchUP*, commence la phase d'extraction du modèle volumique par l'ajout à chaque bâtiment sa propre architecture comme le montre la figure (3.9): Un

<sup>1</sup>Étant donné le temps et les ressources alloués, il fut décidé de limiter la représentation CityGML 3D de la Médina aux niveaux de  $LOD_1$  et  $LOD_2$



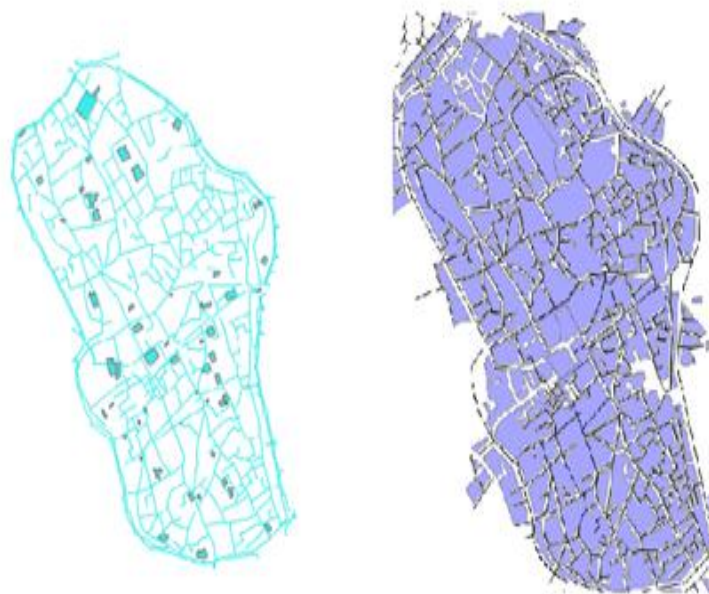


Figure 3.7: Les cartes bidimensionnelles (à gauche la carte non géo référencée et à droite la carte géo référencée.)

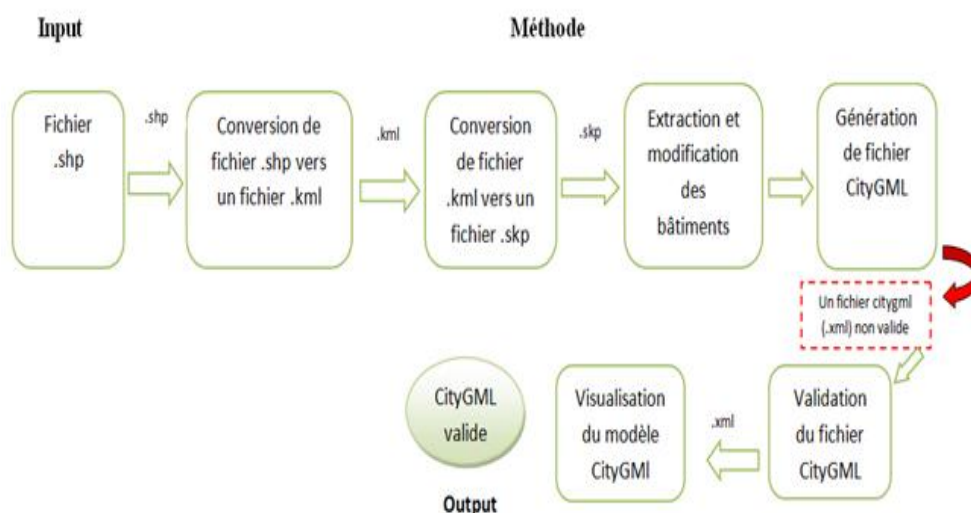


Figure 3.8: Processus de création d'un modèle CityGML 3D.

*plugin* inséré dans *SketchUP* permet générer le code d'une structure générique CityGML. Au fait, le fichier CityGML produit ne génère que l'aspect géométrique et l'architecture des objets modélisés. D'ailleurs, il faut procéder à sa validation pour le rendre conforme aux spécifications normalisées [183].

### 3.3 Application Médina 3D

Maintenant que le modèle 3D de la Médina est construit, il est possible de le visualiser dans *gvSIG*. Ce SIG permet de naviguer dans les différents coins du modèle 3D. La figure suivante contient des saisies d'écran *gvSIG* qui illustrent quelques édifices en format CityGML 3D (3.10):

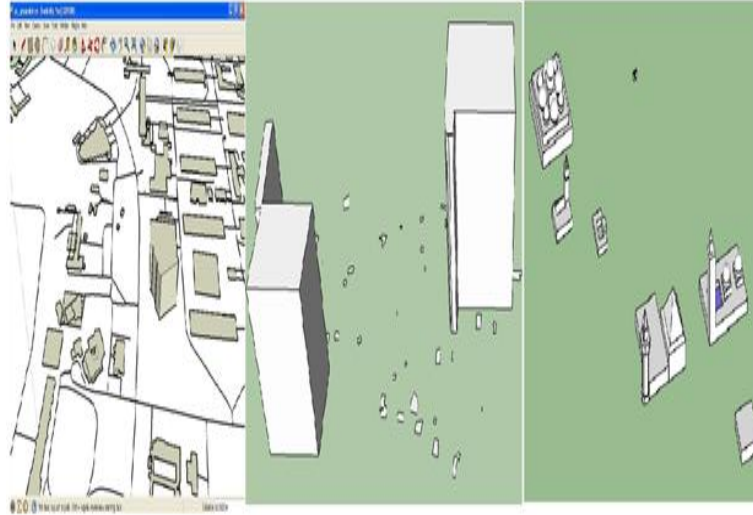


Figure 3.9: Modification des bâtiments dans Google SketchUp.

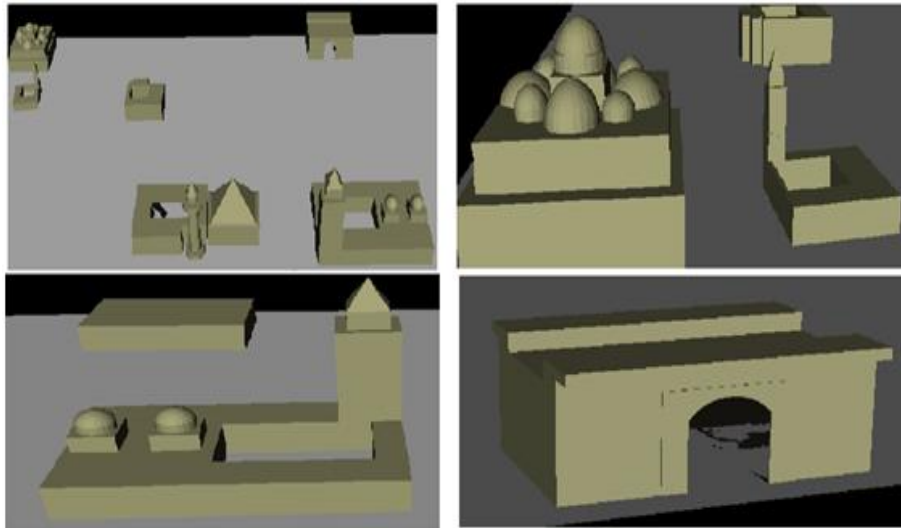


Figure 3.10: Quelques monuments de la Médina en 3D sous *gvSIG*.

Pour permettre autant l'interrogation que la visualisation cartographique des résultats, il existe deux outils *CityGML4j* et *3DCityDatabase*.

- *CityGML4j*: C'est une librairie Java pour l'import-export des fichiers CityGML [35]. Elle est basée sur JAXB [99] qui inclut des fonctionnalités permettant de lire et d'écrire des instances de documents XML. Pour le cas de l'intégration des fichiers CityGML dans une base de données spatiales, le rôle de Citygml4j consiste à créer des instance des monuments comme objets Java puis générer un document CityGML contenant l'arborescence des objets générés.
- *3DCityDatabase*: C'est un outil open source d'import-export des fichiers CityGML, qui assure le stockage, la représentation et la génération des modèles urbains virtuels 3D au sein d'une base de données spatiales [1]. *3DCityDatabase* fut utilisé pour injecter des fichiers CityGML dans les coquilles spatiales comme PostgreSQL/PostGIS [149, 148].

Pour transférer les entités du modèle CityGML, une base de donnée PostGIS doit être créée. Cette base doit supporter les primitives géométriques GML3, l'aspect sémantique, l'information

d'apparence, les orthophotos et la modélisation multi- échelles. La figure 3.11 donne un aperçu différentes tables de la base de données *citydb* construite dans PostGIS pour supporter le contenu du fichier CityGML (3.11):

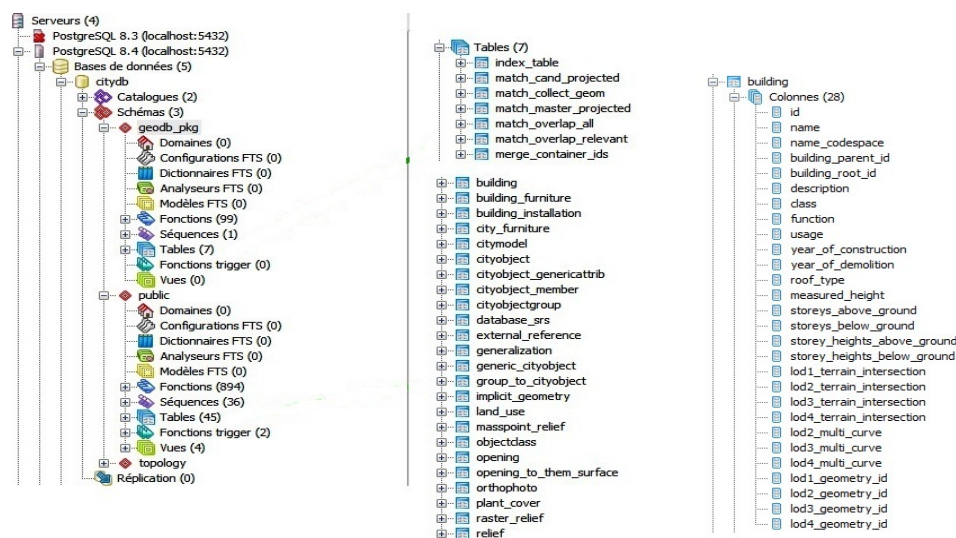


Figure 3.11: La base de données du modèle CityGML.

La fonction d'importation de *3DCityDatabase* va alimenter la base *citydb* en instances tirées du fichier CityGML et ce après avoir indiqué que le système de référence spatiale est *Carthage/Nord Tunisie* ayant pour code *EPSG 22391*.

Le modèle injecté dans PostGIS est fonctionnel. Les interrogations spatiales sont permises comme l'illustre la figure (3.12) où la base est interrogée sur la surface d'un monument.

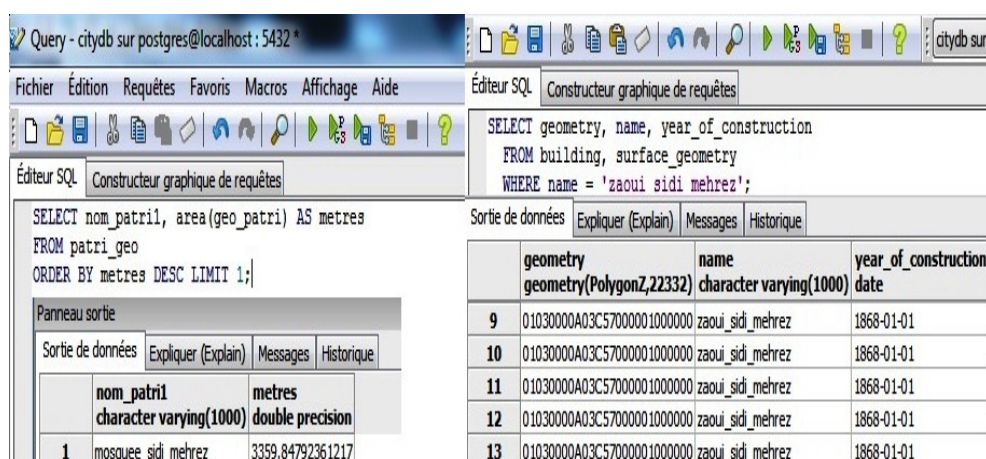


Figure 3.12: Interrogation spatiale.

Toutefois, la taille volumineuse de la base rend certaines requêtes spatiales, comme le calcul de distance ou la recherche du plus court chemin, coûteuses et drainent les ressources du système utilisé.

Les monuments du modèle sont des édifices qui possèdent une histoire et un ancrage temporel. Pour révéler la dimension temporelle, des champs temporels ont été ajoutés comme attributs aux entités

modélisées i.e. *year-of-construction*, *year-of-demolition* et *period*. Ces champs sont utilisés pour formuler des requêtes temporelles. La figure (3.13) en illustre une.

Éditeur SQL

Constructeur graphique de requêtes

select name from building where description= 'husseyniya';

Panneau sortie

Sortie de données

Expliciter (Explain)

Messages

Historique

	name character varying(1000)
1	mosquee_sidi_mehrez
2	dar_ben_abdallah
3	tourbet_el_bey
4	zaoui_sidi_mehrez
5	zaoui_sidi_be_alous
6	dar_el_bey
7	bab_bhar
8	madrasa_el_achouriya

Éditeur SQL

Constructeur graphique de requêtes

select \* from building where '1758-01-01'<= year\_of\_construction and year\_of\_construction <= '1888-01-01';

Panneau sortie

Sortie de données

Expliciter (Explain)

Messages

Historique

	id integer	name character varying(1000)	description character varying(1000)	usage character varying(1000)	year_of_construction date	year_of_demolition date
1	8	mosquee_sidi_mehrez	husseyniya	mosquee	1850-01-01	
2	20	dar_ben_abdallah	husseyniya	dar	1796-01-01	
3	19	tourbet_el_bey	husseyniya	tourba	1758-01-01	
4	17	dar_ben_hamza	othmaniya	dar	1888-01-01	
5	22	zaoui_sidi_mehrez	husseyniya	zaoui	1868-01-01	
6	21	zaoui_sidi_be_alous	husseyniya	zaoui	1820-01-01	
7	24	dar_el_bey	husseyniya	dar	1795-01-01	
8	25	bab_bhar	husseyniya	bab	1860-01-01	

Figure 3.13: Interrogation temporelle.

## 3.4 Conclusion

En conclusion, cette recherche a permis d'explorer la modélisation 3D comme solution pour la sauvegarde des monuments historiques menacés. Elle a permis de répondre aux question scientifiques et a atteint la majorité des objectifs fixés. La question technique pendante et lancinante concerne la disponibilité d'un SGBD qui prend totalement en charge un fichier de type CityGML. Il existe des coquilles comme *eXist*<sup>®</sup> et *BaseX*<sup>®</sup> mais elles s'adressent exclusivement au format XML. Mais le plus important est que la recherche a ouvert la voie à une recherche plus approfondie de niveau doctoral et dont l'objectif serait la création d'une plateforme générique de modélisation dynamique basée sur CityGML hébergée par PostgreSQL. La recherche sur la plateforme a débuté le mois de novembre 2014 au sein de l'équipe *CONTOS*<sup>2</sup>.

# Chapitre 4

## Plateforme WebSIG pour la résolution des conflits.

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Les outils Web 2.0.</b>	<b>80</b>
<b>4.2</b>	<b>La technologie WebSIG.</b>	<b>81</b>
4.2.1	Serveurs Web.	82
4.2.2	Serveurs cartographiques.	82
4.2.3	Bibliothèques logicielles.	83
4.2.4	Système de gestion de base des données.	84
4.2.5	Standards de l'OGC.	84
<b>4.3</b>	<b>Gestion de conflits.</b>	<b>85</b>
4.3.1	Définition d'un conflit.	85
4.3.2	Revue de littérature sur la gestion de conflits.	87
<b>4.4</b>	<b>Application WebSIG développée</b>	<b>89</b>
<b>4.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>93</b>

---

### Introduction.

Les conflits en aménagement urbain et territorial entre population et services publics sont monnaie courante. La population résiste et refuse la mise en œuvre des décrets publics en arguant l'inadéquation des décisions prises par les édiles. Des intérêts individuels et collectifs peuvent être menacés surtout quand la litige porte sur l'aménagement du territoire concernant des dépotoirs de déchets, des barrages, des centres urbains ou même des hôpitaux.

Un étudiant en master a réalisé cette recherche sous ma direction selon l'approche Recherche-Action [102]. Elle s'est proposée d'enrichir la panoplie d'outils d'aide à la résolution de conflits. Elle avance que le couplage des outils Web 2.0 à la cartographie participative permet d'offrir à l'ensemble des intervenants les moyens de contribuer par les suggestions, les critiques et la documentation dans le

but de trouver un terrain d'entente et dégager les situations bloquées. La recherche devrait répondre à des questions scientifiques dont:

- Quels outils Web 2.0 choisir pour rendre compte et encourager de la participation de la communauté?
- Quels outils cartographiques choisir pour rendre compte du point de vue géo-spatial de la communauté?
- Quelle méthode de gestion de conflit adopter pour résoudre les problèmes?

Les objectifs visés par la recherche sont:

- Créer une plateforme WebGIS de participation à la résolution de conflit
- Intégrer et personnaliser les outils Web 2.0 pour assurer la participation
- Implanter une technique cartographique d'aide à résolution de conflit

## 4.1 Les outils Web 2.0.

Selon [137, 10, 39, 29], l'infrastructure Web 2.0 repose sur les technologies suivantes: :

**HTML *Hypertext Markup Language*** et notamment XHTML qui font partie des protocoles fondateurs de la publication sur internet comme les feuilles de style basées sur la recommandation CSS dont la CSS 2.0 datant de 1998. Elles servent à la mise en forme des documents mis en ligne.

**Le langage de script *Javascript*** que Netscape a intégré à son navigateur en 1995.

**XML *Extensible Markup Language*** qui est une évolution du SGML/HTML dont la recommandation a été publiée en 1998.

**ATOM et RSS *Really Simple Syndication*** qui a été créée par Netscape en 1999. Cette technique permet l'accès à une partie d'un site à partir d'autres sites.

**HTTP** permettant l'échange des données sur le réseau. HTTPS en est la version d'accès sécurisé.

**Rest *REpresentational State Transfer*** qui remonte à 2000. Ce style d'architecture permet de développer des applications Web simple.

**API *Application Programming Interface*** Les API permettent de réguler le traitement des opérations sur un serveur distant pour construire de nouvelles applications. Les versions libres ont grandement aidé l'ingénierie des applications Web.

**SQL *Structured Query Language*** créé à la fin des années 1970 et servant comme langage standard d'interrogation des bases de données.

Le Web 2.0 offre un nouveau mode d'utilisation des services internet. Il permet la contribution de l'internaute qui passe de statut de consommateur à celui de producteur de contenu. Certaines des caractéristiques distinctives du Web 2.0 sont:



- La participation: Le Web 2.0 a permis aux internautes de diffuser le contenu qu'ils créent dans les blogs, les forums et les réseaux sociaux. En 2005, [137] disait du Web 2.0 que *"le plus important élément du Web 2.0 est une démocratie numérique complète des idées"*.
- La connectivité: L'enrichissement du contenu du Web est favorisé par le réseautage social ouvert.
- L'ouverture: Le contenu est accessible à tous. La censure est limitée à sa plus basse expression invoquée dans des conditions somme toute extrêmes.
- La personnalisation: L'émergence de l'identité comme support distinctif et légitime des individus réseautés qui choisissent de publier leurs profils, photos, opinions et d'utiliser les services selon les goûts et les besoins.
- La diversité : Franchement favorable à la multiplicité des média d'information, le Web 2.0 supporte ainsi la diversité des formes de communication, d'échange et d'expression.

Comme le montre la figure 4.1, le Web 2.0 est une base de données qui stocke des documents, traite des images, gère des tâches, dispense les messages, lit les flux RSS, etc. Les mêmes individus communiquent en parallèle au moyen de nombreux outils en fonction de préférences individuelles et de la nature de l'échange [12].

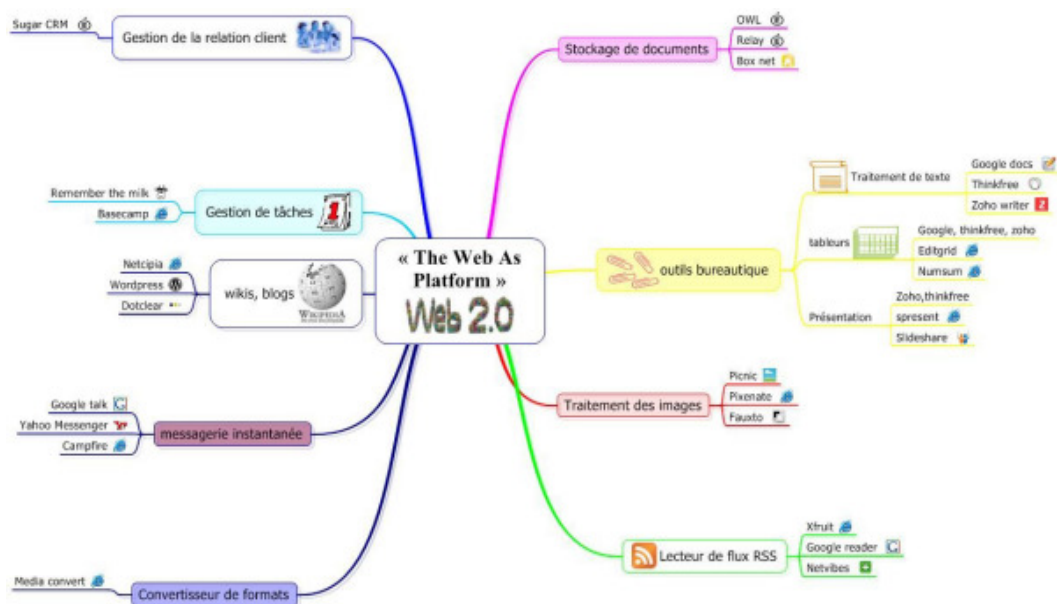


Figure 4.1: Quelques usages communs du Web 2.0 [102].

Les services d'aide à la participation et à la collaboration permettent aux usagers de formuler et d'exprimer des points de vue parfois contradictoires. Le Web 2.0 n'a pourtant pas succombé aux cas de conflits. Il est possible d'avancer qu'avec les outils appropriés de participation et de contributions, les expériences concluantes d'échange via les média sociaux et une ingénierie d'application efficace, il est possible de concevoir une plateforme de gestion de conflits.

## 4.2 La technologie WebSIG.

La Web-SIG marie la technologie des *Systèmes d'Information Géographiques*, *SIG* aux outils Web 2.0 permettant la publication, le partage et le stockage de contenu spatial et autre produit par les

géonautes<sup>1</sup>. Selon [34], le SIG est l'ensemble de matériels et de logiciels informatiques utilisés en vue d'acquérir, de traiter et visualiser des données à caractère géographique en faisant appel à des techniques appropriées (géographie, cartographie, télédétection, photogrammétrie, informatique, géodésie, recherche opérationnelle, etc.). Il a déjà fait démontré son utilité sur plusieurs plans [113, 59, 109]:

- ▶ Il permet de connaître l'état des lieux d'un territoire.
- ▶ C'est un moyen d'aide à la prise de décision dans plusieurs secteurs économiques, sociaux, politiques, culturels et militaires.
- ▶ Il engendre un gain de temps et une augmentation de la productivité.
- ▶ Il permet de générer des documents sur demande et selon les besoins.
- ▶ Il améliore le service offert au public.

Une plateforme WebSIG a besoin d'un serveur Web, d'un serveur cartographique, de bibliothèques logicielles, de SGBD et de normes pour assurer l'interopérabilité et la fluidité de l'échange entre dépôts hétérogènes de données.

#### 4.2.1 Serveurs Web.

Pour le développement des applications, il faut disposer d'un environnement permettant l'ingénierie Web. La pièce maîtresse étant le serveur Web. Le choix se fait entre deux packages gratuits intégrés et typés aux systèmes d'exploitation en usage et qui fonctionnent avec le modèle client-serveur: WAMP (Windows Apache MySQL PHP) et LAMP (Linux Apache MySQL PHP). Le SGBD MySQL pourrait éventuellement être remplacé par le SGBD PostgreSQL [31, 153, 98].

L'environnement WAMP est choisi pour les besoins de compatibilité avec Microsoft Windows. Comme le LAMP, il permet de gérer la dynamique des sites et d'assurer la persistance des transactions.

#### 4.2.2 Serveurs cartographiques.

Un serveur cartographique agit en tant qu'interface avec les bases données spatiales locales, online ou distantes. À partir des années 90, et grâce aux serveurs cartographiques, la technologie SIG émigre avec succès sur le Web pour créer une nouvelle technologie nommée WebSIG. Actuellement et avec la multitude des outils Web 2.0 dédiés à la manipulation des données spatiales, elle atteint un haut niveau de maturité sur les plans de la convivialité, la sophistication, la robustesse et la stabilité. Les gouvernements et les institutions financières et militaires n'hésitent plus à s'en servir dans des missions critiques [22, 113, 125, 124].

Une application WebSIG se base sur un serveur cartographique qui rend accessible une base de données spatiales aux requêtes provenant d'un serveur Web. Il interprète les demandes (écrites en PHP, Javascript, Python ou en Perl) d'affichage d'une carte, procède à la recherche localement ou

---

<sup>1</sup>Dr Ali Frihida a forgé ce terme en 2000



dans des serveurs externes puis à l'envoi du résultat dans un format raster e.g. png ou jpg ou vectoriel e.g. svg ou swf. Plusieurs serveurs sont disponibles dont:

**MapGuide** <http://www.osgeo.org/>. C'est un outil open source facile d'utilisation pour publier des cartes sur Internet.

**MapServer** <http://mapserver.org/>. Cette plate-forme open source sert à publier les données spatiales sur le Web et les applications cartographiques interactives.

**Geoserver** <http://geoserver.org/>. GeoServer est un serveur logiciel open source écrit en Java et permettant aux utilisateurs de partager et modifier des données géospatiales. Conçu pour l'interopérabilité, il publie des données de n'importe quelle source de données spatiales en utilisant des standards ouverts. De plus, il respecte les spécificités de l'OGC qui sont principalement le WMS et le WFS[134].

Pour une information plus complète sur les serveurs surtout libres, le lecteur est dirigé vers le site <http://www.osgeo.org/> maintenu par la *Open Source Geospatial Foundation*.

### 4.2.3 Bibliothèques logicielles.

Plusieurs bibliothèques logicielles orientées données spatiales sont disponibles. Pour une revue exhaustive, le lecteur est dirigé vers [154, 77] et [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_GIS\\_data\\_sources](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_GIS_data_sources). Dans le cas de l'application, deux bibliothèques possèdent un intérêt:

**La bibliothèque OpenLayers** [87] <http://openlayers.org/> est une bibliothèque open source servant la publication du contenu des cartes sur le Web. Par exemple, elle permet de charger des cartes de fichiers KLM ou GeoJSON, de les styliser, de les rendre interactives et de les publier. Pour la création d'une carte, Openlayers utilise deux concepts: 'Map' et 'Layer'. Une carte conserve les informations OpenLayers, les extensions, les unités, la projection, et les primitives géométriques de la carte. A l'intérieur de la carte, les données sont affichées via 'Layer' réfère à une source de données et à la manière de les afficher.

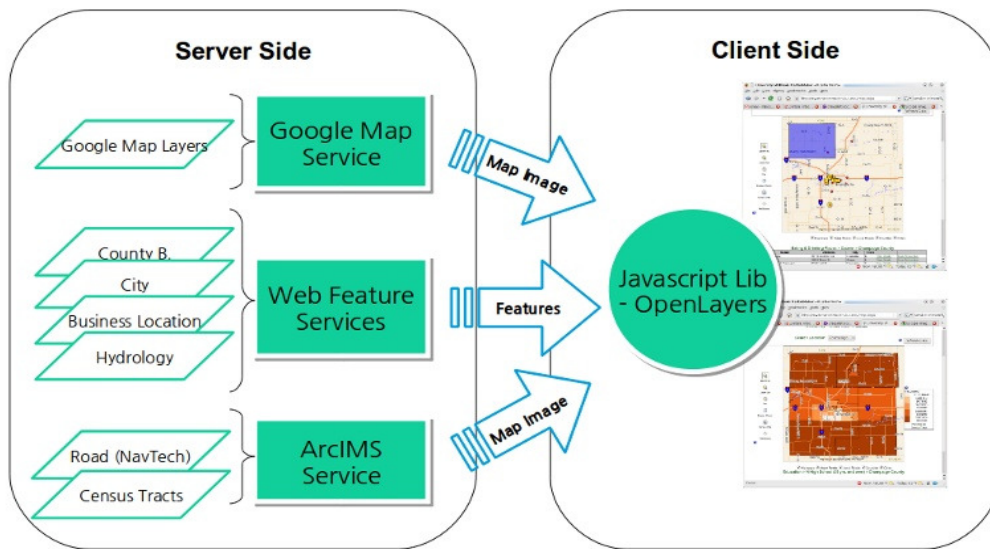


Figure 4.2: Rôle de la bibliothèques OpenLayers [102].

**Les API Google Maps** [21] Les *Application Programming Interfaces* est une spécification utilisée par les composants logiciels Google pour communiquer les uns aux autres. C'est l'une des API la plus riche en méthodes et en classes. Le succès des API Google Maps est le résultat de multiples recherches qui ont abouti à en simplifier l'utilisation et même offrir les services de création de cartes personnalisées.

#### 4.2.4 Système de gestion de base des données.

Le système de gestion de base des données SGBD est une composante principale de la plateforme WebSIG ciblée par la recherche. Il assure les services :

- Gérer les coordonnées des clients et faire les mises à jour correspondantes
- Enregistrer leurs propos et participations
- Réaliser les bilans et les statistiques des participations et des votes

La conception et l'implantation de la plateforme doit obéir à des normes reconnues afin d'assurer l'interopérabilité et l'échange des données.

#### 4.2.5 Standards de l'OGC.

Pour le développement d'une plateforme WebGIS, il est recommandé de respecter certaines normes qui assurent entre autres l'interopérabilité. L'Open Geospatial Consortium (OGC) est l'organisme référence en matière de normalisation des données spatiales. [134, 135]

En effet, cet organisme publie des normes et des protocoles tels que :

**WMS *Web Map Service*.** A partir d'une simple requête normalisée envoyée par un serveur Web vers un serveur cartographique, ce standard permet de retourner l'image demandée retrouvée localement ou dans un serveur distant.

**WFS *Web Feature Service*.** Ce standard offre un accès direct aux attributs des données spatiales.

**WCS *Web Coverage Service*.** Ce service permet la récupération électronique de données géospatiales comme des couches ou couvertures (layers, covers).

**KML *Keyhole Markup Language*.** C'est un langage de balisage utilisé par Google pour l'accès aux données et la définition des styles des données depuis Google Maps et Google Earth.

La décision finale concernant l'environnement de développement de la plateforme a porté sur les API de Google. Cette bibliothèque va assurer le développement et l'intégration de tous les modules nécessaires.

## 4.3 Gestion de conflits.

La plateforme ciblée devrait être en mesure de permettre aux protagonistes du conflit d'intervenir et de faire valoir leurs points de vue afin de considérer les points de litige et explorer les avenues de solution.

### 4.3.1 Définition d'un conflit.

Un conflit est défini comme étant une opposition de besoins ou d'intérêts (voire de valeurs) entre deux ou plusieurs parties dont la solution peut-être recherchée soit par des négociations, soit par la médiation, soit par recours à la violence. Il est engendré par un écart entre une situation existante et une situation souhaitée, l'accumulation d'insatisfactions, de frustrations, d'un ou plusieurs problèmes non résolus, marqués soit par leur aspect aigu soit par leur aspect chronique.

En général, un certain nombre de causes donnent forme au conflit à savoir :

- ▶ La perception: qui détermine la façon de voir le problème et les moyens à prendre pour le résoudre.
- ▶ Le doute: qui est engendrée ou engendre l'absence de confiance entre protagonistes.
- ▶ La faillite des négociations: qui remet le conflit dans la case de départ.

Comme tout processus, le conflit suit un cycle de vie durant lequel il passe par différents stades d'évolution en partant de l'émergence du conflit qui peut prendre fin à n'importe quelle étape suite à la signature d'une entente consensus entre les parties prenantes. Le cas contraire, un état de blocage qui peut faire pourrir la situation et engendrer le chaos, la violence ou le retrait d'un des protagonistes qui n'a plus les moyens de résister. La figure 4.3 résume les stades d'un conflit en fonction de son intensité et du temps [45].

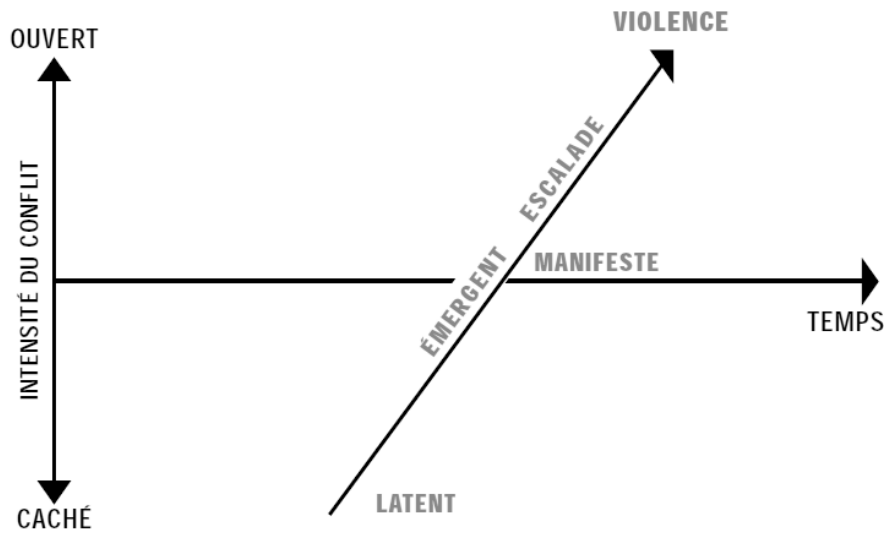


Figure 4.3: Schéman d'évolution d'un conflit [102].

On distingue plusieurs types de conflits:

1. Le conflit interpersonnel qui oppose au moins deux individus à propos des limites d'une parcelle de terrain par exemple.
2. Le conflit intragroupe au sein d'un même groupe qui affecte son fonctionnement tel un conflit relatif à l'allocation de l'eau d'irrigation ou l'aménagement du territoire.
3. Le conflit intergroupe entre un ou plusieurs groupes tels les conflits territoriaux entre les tribus ou nations.
4. Le conflit organisationnel au sein d'une entreprise.

Dans notre application, le conflit est de la seconde catégorie et réfère à une litige qui oppose des citoyens menacés par les inondations et une administration publique taxée d'incompétence parce qu'elle n'a pas adopté une stratégie d'urgence.

Selon la littérature [41, 20, 146], il existe plusieurs approches de gestion de conflits à savoir 1) l'évitement du conflit par sa résolution avant qu'il ne se déclare, 2) l'arbitrage qui est une décision informelle prise par une tierce partie suite à une médiation, 3) le règlement judiciaire qui est une décision judiciaire faisant autorité. La première et la seconde approche ont le franc mérite d'inclure les citoyens plus que la troisième dans la prise de décision en les faisant participer aux négociations et en leur demandant d'exprimer leur point de vue et défendre leurs intérêts.

La participation est le processus qui aide les individus à influencer les prises de décision qui les affectent et à prendre une certaine part dans le contrôle et la supervision de l'application des directives. Dans ce cadre, la théorie de la coopération en matière de politiques urbaines assure qu'il est impossible de gouverner les grandes agglomérations urbaines sans faire participer plusieurs

catégories d'acteurs [85].

Dans le cas de la plateforme à développer, la participation s'implémente à travers la technologie de l'information géographique qui vise à créer des opportunités de collaboration dans un processus participatif d'aménagement. [158]

En d'autres termes, pour implémenter une plateforme populaire, reconnue et visitée, il faut respecter plusieurs critères relatifs à l'accès au site Web, aux services offerts et à la mise à jour afin de promouvoir la collaboration, l'expression des opinions et la recherche d'entente à travers l'attraction des acteurs impliqués dans le conflit. Selon [54], ces approches participatives se trouvent toujours face à des problèmes de pertinence et d'acceptabilité parfois dûe à l'âge, l'intérêt ou le niveau éducatif. Une stratégie doit être tracée afin de s'assurer qu'il n'y aura pas de contraintes au cours de la phase d'exécution. Par là, une série d'interrogations [40]:

- ▶ Comment peut-on intervenir d'une façon fiable pour en sortir une connaissance suffisamment fine?
- ▶ Comment s'assurer de la pertinence du choix des citoyens à l'égard du contexte qui les concernent ?
- ▶ Quelle démarche à suivre pour faire inclure le maximum des citoyens intéressés?
- ▶ Comment synthétiser objectivement les points de vue contradictoires?

La réussite de la gestion d'un conflit est dépendante des résultats obtenus. Si une entente est atteinte et que des résultats positifs et constructifs sont en vue, il est légitime de se déclarer satisfait de l'issue.

#### 4.3.2 Revue de littérature sur la gestion de conflits.

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur le développement d'applications pour la gestion de conflits. Les plus pertinentes sont présentées dans les paragraphes suivants:

**WePWEP: Web-based Participatory Wind Energy Planning** [167] L'implémentation de cette plateforme découle d'un conflit d'ordre énergétique au nord du Royaume Unie. Cette expérience opte pour la valorisation de l'énergie éolienne et la recherche de nouvelles sources d'énergie avec moins de pollution et plus d'efficacité. En effet, cette initiative prétend viser le renforcement de la production de l'énergie sans émission du gaz CO<sub>2</sub>, élément principal de pollution de l'atmosphère. Pour assurer la pertinence du projet d'énergies renouvelables, le gouvernement britannique confie à ses fonctionnaires la mission de choisir la localisation du projet. A leur tour, les écologistes font participer la communauté concernée à travers un SIG-participatif [109] porté plus tard sur le Web afin de permettre aux gens de s'exprimer.

La plateforme WePWEP offre l'opportunité de manipuler les cartes e.g. agrandir, faire un panoramique, sélectionner des couches, etc. en ligne afin de choisir des critères de localisation du site et d'exploiter les contributions des autres visiteurs. Le citoyen peut commenter les propos postés sur le site.

**WPPS: (Web-based Public Participation System)** [144]

Cette plateforme sur le Web est implantée en vue d'améliorer la participation du public dans le processus de la prise de décision. Cette application offre à la communauté des outils d'analyse et des informations pour s'exprimer et discuter les sujets d'actualité. L'application propose différents degrés de sophistication et interactivité selon le profil de l'intervenant et le niveau de sa participation dans le processus de la prise de décision.

C'est la prélude d'une nouvelle génération d'outils GIS faciles à utiliser par le public lors des débats politiques.

**Web-based PFR: (*Planning For Real*)** [105]. L'application *Web-based public participation geographical information systems: an aid to local environmental decision-making* fut développée comme une initiative et un moyen d'implication de la communauté locale afin d'aider la prise des décisions concernant les problèmes environnementaux. Pour atteindre cet objectif, une interface fut créée afin d'augmenter la conscience de la possibilité du développement et du changement au sein de la communauté, d'encourager l'expression des opinions et d'aider la communauté locale à parvenir à un consensus concernant les cas conflictuels.

**MCEA: (*Municipal Class Environmental Assessment*)** [116]. C'est une expérience pilotée par le gouvernement canadien qui s'est engagé à faciliter la participation du public dans les projets d'évaluation de l'environnement à travers une plateforme appelée MCEA. Le MCEA s'applique aux organismes du secteur public qui entreprennent des projets d'infrastructure d'eau, d'eaux usées et de routes. De plus, le gouvernement se charge de laisser le libre accès à la documentation. Le volet *Web-based* de l'application permet aux citoyens entre autres de consulter la documentation des projets et de retrouver la synthèse des réunions précédentes. La participation du public via le Web assure la réduction de l'impact des absences. Un volet WebSIG est offert pour l'expression des points de vue et la formulation des décisions. La réussite de la plateforme surtout son volet cartographique a suscité l'appel à une application de forum public virtuel *GIS-enabled virtual public meeting space for public participation* [118]

**GeoDF: (*Geographic Discussion Forum*)** [193]. Ce WebSIG est basé sur une étude menée par la ville de Fredericton au New Brunswick (Canada) pour évaluer l'impact des PPGIS sur l'amélioration des services publics dans le cadre de l'E-Gouvernance. Les citoyens peuvent communiquer avec l'administration grâce à des cartes et des outils d'analyse et de traitement. Le gouvernement, qui a financé le projet, tient à améliorer la politique de gestion foncière, la planification du territoire et la prise de décision. Une composante principale est le prototype de GeoDF, un forum de discussion en ligne en utilisant la cartographie basée sur une solide infrastructure de données spatiales (SDI) pour assurer le bon fonctionnement du processus, une communication efficace et une compréhension mutuelle entre les parties prenantes.

**Ushahidi:** (<http://www.ushahidi.com/>). Ce site utilise le *crowdourcing* au service de la cartographie sociale sur la base d'une combinaison d'activisme social, de journalisme citoyen et d'information géographique. Il se sert de *Swift River* <https://github.com/ushahidi/SwiftRiver> qui est une plateforme open source de traitement de gros volumes d'information. Ushahidi a radicalement changé la manière dont les individus et les communautés peuvent influencer sur la démocratie et le développement économique. En passant par le séisme en Haïti

jusqu'à la double catastrophe japonaise du 11 mars, au Chili, au Pakistan, au Congo, aux Philippines, au Pérou, et aussi à Gaza lors des raids israéliens, la plate-forme ushahidi s'est imposée comme une source alternative d'information instantanée.

Ushahidi permet de situer sur une carte en ligne tous les appels, les témoignages, les SMS émanant d'une source qui désire participer. L'information publiée est considérée pertinente, efficace, efficiente, ayant de l'impact et durable [19].

En fait, par l'intégration de la cartographie et des SIG dans les applications d'aide à la participation, les propos du citoyen trouvent les moyens d'amplification vu la crédibilité du témoignage et de la vision qu'il transmet surtout quand il est au cœur de la crise ou du conflit.

Reste que pour un plein rendement et en considération de la capacité des citoyens à identifier leurs intérêts et à formuler leurs opinions, il faut généraliser l'apprentissage et l'utilisation des TIC. Or dans le cas de notre application, la pénétration des TIC et de l'internet reste limitée à certaines cohortes sociales d'âge, de revenu bien spécifiques et des zones géographiques historiquement favorisées. Donc, l'approche Web-GIS doit être considérée comme un moyen complémentaire pour faciliter la participation publique et les méthodes traditionnelles ne doivent pas être éliminées tant que les nouvelles technologies n'ont pas été adoptées massivement par les personnes concernées.

## 4.4 Application WebSIG développée

La plateforme développée présente un page d'accueil comme le montre la figure 4.4

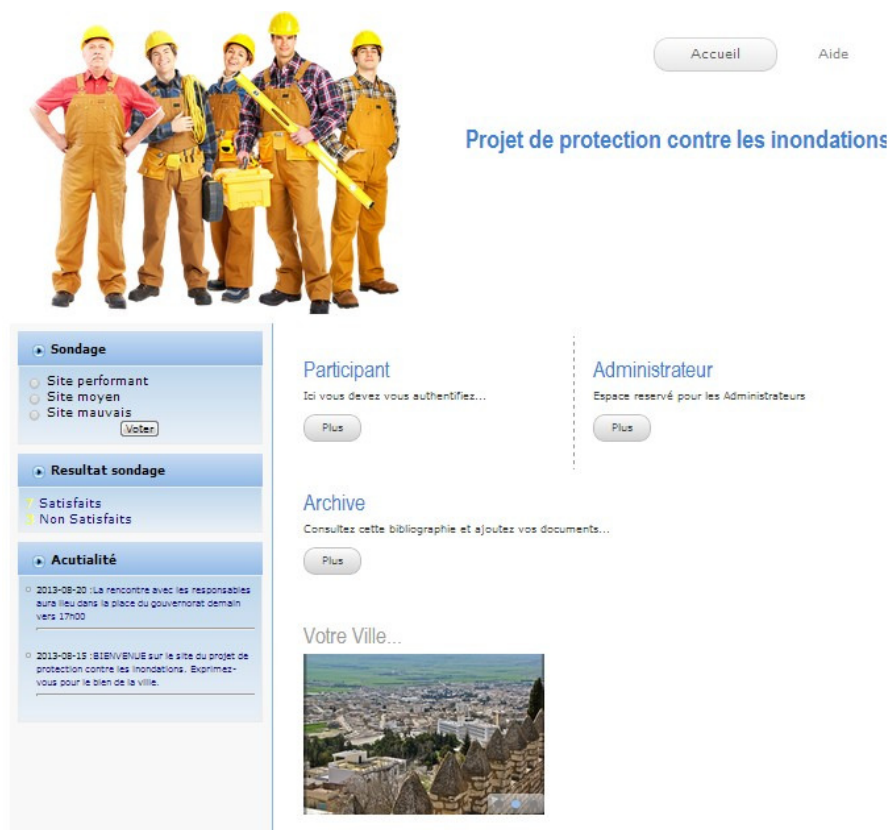


Figure 4.4: Page d'accueil de la plateforme WebSIG [102].

À part les fonctions classiques de l'administrateur du site, celles d'authentification, de gestion de forum, d'administration de questionnaire, d'affichage d'information et suivi de nouveautés, d'évaluation du site, l'application propose une carte de la région du conflit. Elle permet aux citoyens d'intervenir en ajoutant leurs points de vue sur les localisations d'hébergement d'ouvrage de lutte contre les inondations, les parcours des cours d'eau dans le cadre de la construction de bassin d'écêtement pour accueillir l'excès des eaux pluviales.

Ainsi, le citoyen dispose d'un pointeur qu'il utilise pour sélectionner l'emplacement où devrait être le construit. La figure 4.5 montre les pointeurs déposés par des participants.

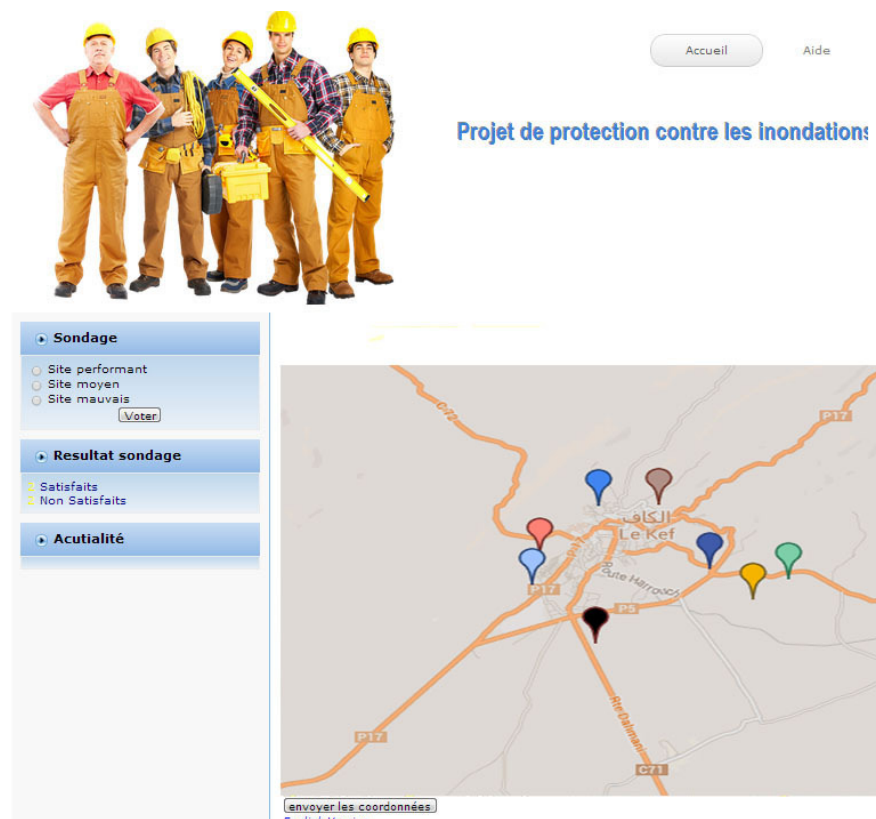


Figure 4.5: Sélection de localisation par pointeur [102].

Les coordonnées géographiques des pointeurs sont sauvegardées et serviront à étudier la contribution des citoyens. Une analyse visuelle et ultimement spatiale sur la distribution des pointeurs e.g. *clustering*, *neighborhood* serait appropriée pour caractériser la proximité des points de vue des citoyens et de ceux des experts. Les citoyens disposent aussi d'un stylet pour tracer des lignes correspondant aux cours d'eau vers bassin d'écêtement comme le montre la figure 4.6.



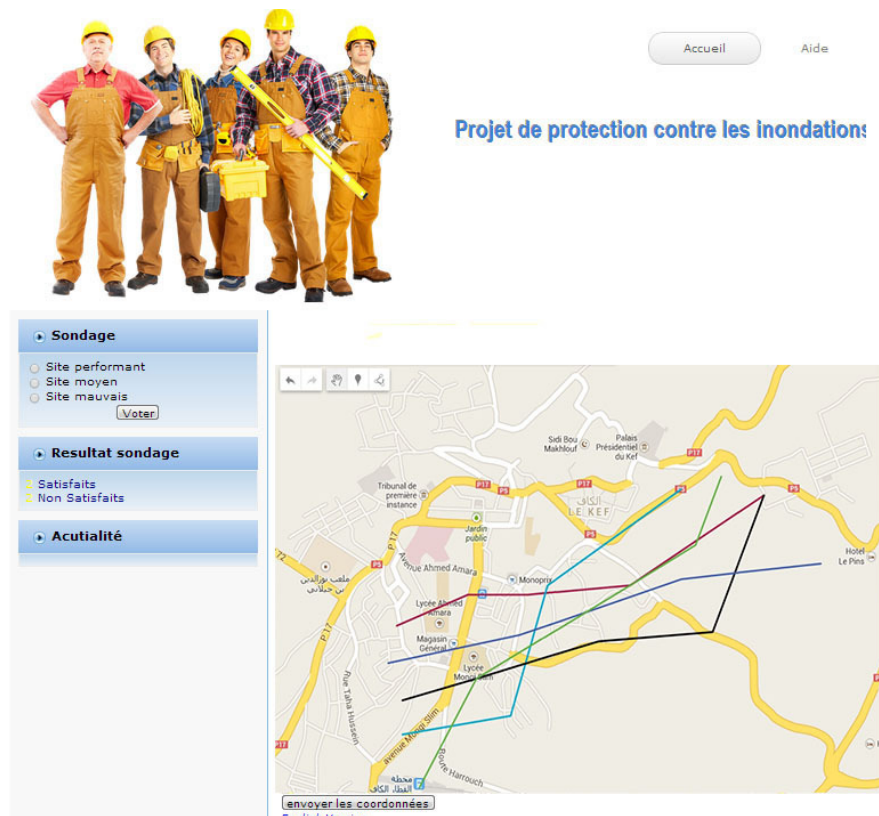


Figure 4.6: Traçage des lignes [102].

Les coordonnées géographiques des lignes sont sauvegardées et serviront à étudier la contribution des citoyens. Une analyse visuelle et ultimement spatiale permet de dégager les points de vue convergents. D'ailleurs, les tracés des lignes pourraient aider les services topographiques à valider leur base données hydrographiques en comparant les cours d'eau qu'ils ont avec ceux enlignés par les citoyens.

Finalement, un outil de traçage de polygones est offert essentiellement aux décideurs pour tracer les limites spatiales des contributions (pointeurs, lignes). Cette action permet de faciliter la prise de décisions dans la mesure où, visuellement, il est possible de choisir l'emplacement du bassin.

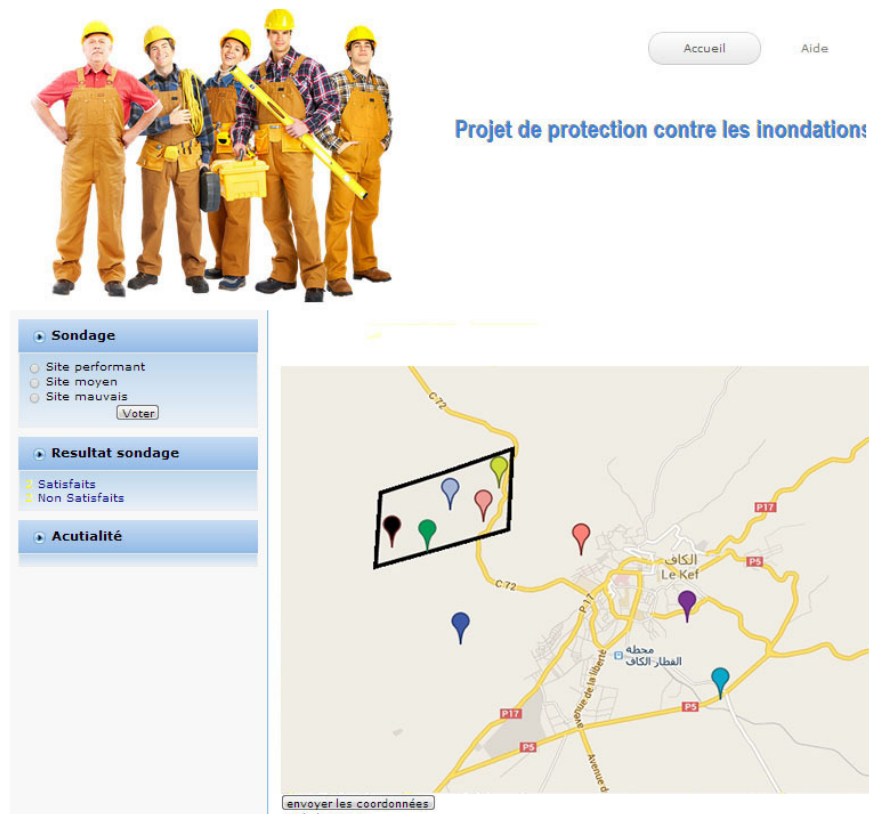


Figure 4.7: Traçage de polygone [102].

Dans la figure 4.7, un expert a encadré quelques pointeurs dont les auteurs semblent choisir le même lieu pour construire la retenue d'eau.

Ainsi, les contributions sur la carte peuvent servir à résoudre le conflit. Des pointeurs éparpillés sur la carte indiquent que les avis des participants ne s'accordent pas sur le même endroit. Les experts publics doivent approfondir leurs études et prendre l'initiative de proposer d'autres lieux. Ainsi, les citoyens seront appelés à choisir parmi les possibilités existantes techniquement validées. Cette décision peut mener à un consensus auprès des protagonistes et éviter l'escalade.

Des pointeurs regroupés dans la même zone signifient que les participants comptent avoir la retenue d'eau dans cette région. Donc, la négociation entre les deux parties a trouvé un terrain d'entente parce que les citoyens ont fait un choix volontaire et presque unanime.

Dans le cas des stylets, la divergence des lignes indique que le réseau d'eaux pluviales est à réviser et les lignes tracées par les citoyens et qui se rapprochent adéquatement du réseau réel doivent être considérées pour la mise à jour. Il peut s'agir de cours d'eau qui se sont détériorés sous l'effet des facteurs climatiques. Donc, cette situation demande plus d'efforts de la part des pouvoirs publics pour valider les lignes dans les phases avancées du projet. Toujours est-il que les méthodes traditionnelles ne doivent pas être rejetées et que des séances de *public hearings* doivent être organisées.

Dans une région où les lignes sont très proches et d'autres se confondent, il s'agit probablement

d'un ou plusieurs cours d'eau qui ne sont pas pris en compte lors des relevés topographiques. Les services publics doivent effectuer des visites sur terrain pour valider ces détails et mettre à jour la base de données hydrographiques officielle.

Concernant l'utilisation des polygones, cet outil propose une analyse visuelle des contributions des participants afin de trouver un compromis entre les différentes parties impliquées. Dans le cas où la surface du polygone tracé est réduite, la situation autorise de prendre l'initiative de proposer un consensus entre les citoyens. Par contre, si un polygone est étalé sur une grande surface, il y a nécessité de communiquer avec les intervenants et valider leurs contributions avec les données des études hydrographiques.

## 4.5 Conclusion

Inspirée par l'approche Recherche-Action, cette recherche a combiné les techniques de résolution de conflits avec la technologie WebSIG pour développer le prototype d'une application Web qui offre aux citoyens des outils pour faire valoir leurs points de vue concernant la protection contre les inondations et la manière de résoudre le conflit. Le volet SIG bien servi par les API Google Maps permet d'exploiter les données cartographiques pour obtenir les contributions basés sur la conscience spatiale des citoyens.

L'issue immédiate de la recherche confirme la pertinence des outils Web 2.0 pour recueillir la contribution des citoyens et les encourager à la participation dans la prise de décisions qui les concernent. D'autre part, la dite pertinence doit être soutenue par:

- La conception et le développement d'interfaces dotées d'une meilleure ergonomie et une convivialité adoptée au contexte social de la communauté ciblée. La sagesse collective trouve ainsi un espace d'expression.
- Pour engager des discussions sereines et rationnelles, il faut implanter un système d'aide à la décision qui organise les différentes contributions, les analyse et propose des avis de solution.

L'issue plus lointaine concerne:

- La transformation de la participation citoyenne dans les prises de décisions en une tradition quotidienne. Ainsi, l'opinion publique ne sera plus confisquée par une minorité qui se targue d'expertise pour imposer ses points de vue. C'est la stratégie du *citizen empowerment* qui vise à redonner le pouvoir aux citoyens.
- La nécessité de développer d'autres outils interactifs conviviaux adaptables au contexte cognitif des éventuels utilisateurs.
- La propagation du savoir technologique par des programmes professionnels de *capacity building* en NTIC.

# Chapitre 5

## Ontologie des connaissances ancestrales en irrigation.

### Sommaire

---

<b>5.1</b>	<b>Introduction.</b>	<b>94</b>
<b>5.2</b>	<b>Modélisation des connaissances ancestrales.</b>	<b>95</b>
<b>5.3</b>	<b>Web 2.0 et outils participatifs</b>	<b>97</b>
<b>5.4</b>	<b>Web sémantique et modélisation des connaissances</b>	<b>98</b>
<b>5.5</b>	<b>Documentation et cueillette du savoir ancestral</b>	<b>102</b>
5.5.1	Plateforme développée	104
<b>5.6</b>	<b>Modélisation des aménagements hydrauliques d'irrigation par OWL</b>	<b>107</b>
<b>5.7</b>	<b>Interrogation de l'ontologie Irrigation</b>	<b>110</b>
<b>5.8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>113</b>

---

### 5.1 Introduction.

Les connaissances ancestrales (autochtones, indigènes, locales ou traditionnelles) sont un type de connaissances produit à travers les âges et partagé par les communautés autochtones. Ces connaissances sont liées à tous les actes quotidiens et vitaux de la communauté e.g. société, agriculture, commerce, industrie, médecine, éducation, catastrophes naturelles [26]. La maîtrise de ces connaissances s'avère d'une grande importance pour une utilisation durable et une réhabilitation des méthodes traditionnelles de résolution des problèmes tout en évitant l'imposition ou l'importation de nouvelles méthodes qui pourraient menacer les structures idéelles et sociétales. Pour comprendre ces connaissances et les faire évoluer, il est possible d'avancer qu'il est utile de les modéliser afin de les conserver, publier et enrichir.

La vérification de cette hypothèse fut l'objet d'une recherche en master menée sous ma direction et qui fut soutenue avec succès [195].

La recherche devrait répondre à des questions scientifiques dont:

- Comment modéliser le savoir ancestral sur l'irrigation par une ontologie?

- Quelle manière d'acquisition et quelles sources de connaissances utiliser?
- Quels aspects du savoir modéliser?

Les objectifs visés par la recherche seraient:

- Créer une plateforme Web d'échange et d'acquisition des connaissances sur l'irrigation.
- Modéliser et représenter le savoir disponible sur l'irrigation en une ontologie.
- Publier l'ontologie sur la plateforme et la rendre accessible à l'interrogation.

La méthodologie utilisée pour répondre aux questions et réaliser les objectifs de la recherche s'inspire de l'approche Recherche-Action.

## 5.2 Modélisation des connaissances ancestrales

La connaissance ancestrale possède les caractéristiques suivantes:

- C'est le résultat d'une longue expérience et mitige avec les moyens du bord les impacts négatifs de catastrophes naturelles.
- Elle fournit des connaissances de base ancrées dans le terroir.
- Elle répond aux besoins locaux d'une culture, d'un environnement et d'une économie.
- Elle utilise des compétences locales et du matériel adapté de et à l'environnement local.
- Elle est portable à d'autres environnements similaires et transmise aux générations futures.
- Elle est menacée de disparition sinon du rétrécissement de son espace géographique et social.
- Des groupes sociaux autres qu'autochtones peuvent en avoir comme les pêcheurs, les pasteurs et les fermiers.

Les connaissances scientifiques et les connaissances locales sont cadrées par deux épistémologies différentes [100].

En comparant les connaissances empiriques modernes dites *scientifiques* et les connaissances ancestrales, des différences peuvent émerger:[181],

- La connaissance ancestrale n'est pas encadrée par une réglementation qui protège les droits de propriété intellectuelle contrairement à la connaissance moderne qui, dans certains cas, usurpe le savoir ancestral et le transforme de propriété communautaire en propriété privée.
- Le mode de transmission: les connaissances ancestrales sont transmises essentiellement par voie orale d'une génération à une autre alors que les connaissances scientifiques sont transmises par plusieurs moyens dont l'écrit;
- Le mode de raisonnement: le raisonnement des connaissances ancestrales est essentiellement subjective, holistique, intuitif et qualitatif alors que la science moderne prétend percevoir le monde d'une manière essentiellement objective, analytique, positiviste et quantitative.
- La connaissance ancestrale n'est pas basée sur des règles fixes i.e. cause et conséquence ou des modèles mathématiques bien définis. En général, il s'agit d'un ensemble des concepts liés sémantiquement avec leur propre dynamique et règles d'inférence qui font appel à des intervenants exclus de la science moderne.
- Les producteurs des connaissances: les connaissances locales sont générées par les utilisateurs des connaissances tandis que les connaissances scientifiques proviennent des structures dédiées à la recherche scientifique qui produisent des résultats.

- Les relations et hiérarchies: dans le monde autochtone, on tient compte des relations sociales et spirituelles avec le monde. On se base entre autres sur la nature (animisme) pour donner des explications aux phénomènes physiques ou sociaux. Pour les sciences modernes, on sépare le monde spirituel et social et les connaissances scientifiques. Tout est sous le contrôle du mode positiviste.

A l'évidence, il s'agit de deux perceptions différentes du monde. De voix se lèvent pour souligner l'importance d'harmoniser les deux modes de savoir pour la résolution des problèmes de développement surtout d'ordre écologique. Reste que cette harmonisation fait face à des obstacles dont l'unification des moyens de documentation et des stratégies d'exploitation avantageuse pour les deux camps [23].

Par conséquent, il faut certainement procéder à la documentation du savoir ancestral en faisant participer les autochtones dans le processus et créer un cadre institutionnel administratif et juridique qui servirait de cadre de référence et d'arbitrage en cas de litige [15].

C'est dans cette mouvance que s'inscrit le projet de modélisation des connaissances ancestrales en irrigation en Tunisie. La modélisation des connaissances est l'ensemble de formalismes et modèles ayant comme but la représentation des connaissances dans un format lisible par machine. Le but étant le traitement et le partage du savoir au niveau sémantique. C'est aussi la description de ce savoir à l'aide d'un langage de représentation de connaissances dotée d'une syntaxe formelle permettant de faire des inférences.

Tout projet de modélisation des connaissances passe par cinq étapes:

1. Acquisition des connaissances.
2. Validation des connaissances.
3. Représentation ou modélisation des connaissances.
4. Inférences.
5. Justification et explication.

Ces phases sont animées par plusieurs intervenants dont deux essentiellement :

**L'expert.** Il représente la principale source des connaissances qu'on va acquérir.

**Le cognitif ou l'ingénieur des connaissances.** il possède les compétences pour l'acquisition et la modélisation des connaissances.

Vu la spécificité du savoir ancestral, la modélisation des connaissances ancestrales doit prendre en considération certains traits distinctifs mais dont l'impact est important sur le résultat final.

Ainsi, la population indigène doit être impliquée non pas seulement comme source de savoir spécifique mais surtout comme principale décideuse dans le processus de modélisation en tant que tel [93].

L'absence de cadre juridique régissant la propriété privée chez les peuples autochtones ne signifie pas que leur connaissance est sans propriétaire et qu'il est permis d'en profiter et de spolier ses producteurs de droits autrement bien défendus dans les sociétés dites modernes. Les propriétaires traditionnels doivent être encouragés à définir et contrôler les droits d'accès à leurs ressources, en vue de soutenir les lois traditionnelles et ainsi empêcher les abus des intérêts personnels nouvellement introduits comme celui de l'héritage. Et s'il y a cas de concession négociée, les autochtones doivent recevoir une juste compensation pour l'exploitation de leurs ressources naturelles et intellectuelles [93].

Le choix des technologies du Web pour la modélisation des connaissances ancestrales sur l'irrigation a permis de répondre aux besoins particuliers de ces connaissances: ouverture, participation, modélisation et protection des droits intellectuels. La plateforme visée par l'équipe *CONTOS*<sup>2</sup> est été pensée dès le début pour être ouverte et utilisable par chaque individu ou entité qui s'intéresse à l'acquisition ou au partage des connaissances ancestrales sur l'irrigation.

### 5.3 Web 2.0 et outils participatifs

Il fut décidé d'utiliser les ressources offertes par le Web 2.0 pour la modélisation du savoir ancestral et pour la publication du modèle généré. Dans les paragraphes suivants, une esquisse de la technologie Web 2.0 est présentée.

Le Web 2.0 constitue une évolution qualitative par rapport au Web 1.0. En fait, il ne s'agit pas uniquement d'une évolution technologique mais aussi une redéfinition du *mode d'emploi* du Web classique.

Également nommé Web collaboratif ou Web participatif du fait qu'il permet à l'internaute de créer et publier un contenu Web. Par conséquent il ne s'agit plus du mode de communication simplex mais plutôt un mode full duplex.

Les caractéristiques du Web 2.0 convergent vers un point nodal qui est la génération du contenu par l'utilisateur qui participe à des *rich use experiences*. C'est cet esprit démocratique et *open* qui a favorisé l'apparition d'innombrables médias sociaux libres dont certaines transforment le Web en base de données e.g. Youtube, Flickr, Myplace, etc... qui ne cessent de s'enrichir par la contribution des usagers et par la diversité des médias.

Il existe plusieurs facteurs technologiques qui expliquent l'expansion du Web 2.0, la diversité de ses outils et la richesse de son contenu :

**Standardisation des langages Web.** le Web 2.0 se base sur les langages HTML et XHTML5 et CSS6 pour les feuilles de styles. Il utilise aussi les langages de scripts comme les langages ASP,

PHP, Javascript, Python, etc. L'utilisation du standard XML 8 facilite la migration vers le Web 3.0 ou le Web sémantique. XML est surtout utilisé comme base des langages sémantiques. [10]

**Architectures, protocoles et modèles de programmation légère** Un des principes du Web 2.0 est le principe *Lightweight Programming Models* [137]. Ce principe repose sur l'accès aux services à distance dont *REST*, *Representational State Transfer* [39] pour applications simples et *SOAP*, *Simple Object Access Protocol* [123] pour applications robustes, complexes, fiables et sécurisé .

**Ajax et les interfaces enrichies** Un autre principe basé sur le *Rich Internet Applications*, *RIA* consiste à ne rafraîchir que la zone qui change d'une page Web. Il est implanté par plusieurs technologies e.g. Ajax, Flash, Flex, Silverlight de Microsoft ... etc.

**Les API ouverts.** <http://www.programmableweb.com/apis> L'un des facteurs qui ont favorisés l'émergence du Web 2.0 est la libre disponibilité des Web API. L'utilisation libre de ces API à contribué à rendre plus facile le développement d'applications et par ricochet à diversifier le contenu du Web. Parmi les API les plus utilisés e.g. API Google Maps, AmazonRest, GoogleFinanceNews, etc [29].

Étant ouvert à la contribution des usages, le Web 2.0 dispose de l'infrastructure nécessaire pour l'acquisition des informations, matières premières des connaissances. Ainsi, un grand nombre d'experts et de connaisseurs peuvent participer au processus d'acquisition de connaissances en relatant leur savoir et leurs expériences. Cette participation peut aussi profiter des outils multimédia disponibles en plus des outils collaboratifs afin d'expliciter et mettre en forme le savoir partagé. Reste que l'exploitation efficiente des documents produits par ces collaborations n'est possible que dans le cadre du Web sémantique ou Web 3.0.

## 5.4 Web sémantique et modélisation des connaissances

Le *Web sémantique*, *Linked Data* ou encore *Web 3.0* fut conçu comme un espace structuré des connaissances compréhensibles aux humains et lisibles par les machines. Il intègre, en plus des liens hypertextes entre les ressources, des liaisons sémantiques entre les concepts du contenu. Il est défini comme suit "*The Semantic Web is not a separate Web but an extension of the current one, in which information is given well-defined meaning, better enabling computers and people to work in cooperation*" [16, 17].

Ainsi, le Web sémantique autorise l'ingénierie des connaissances qui structure l'information et la transforme en savoir. Cet objectif est atteint grâce à la publication et l'implémentation des standards ouverts pour la représentation des connaissances sur le Web e.g. XML, RDF, RDFS, OWL, etc. Le langage de requête SPARQL est conçu pour exploiter ces ressources formellement structurées [163, 152].



Parce que l'ontologie est *une spécification explicite d'une conceptualisation* [74], elle permet donc une représentation formelle, explicite et partagée d'un savoir. [171].

La littérature mentionne plusieurs classes d'ontologies dont:

- ▶ Le vocabulaire contrôlé. C'est un ensemble de termes d'un domaine sans relations hiérarchiques recommandé pour une utilisation dans l'indexation des documents.
- ▶ La terminologie. C'est un ensemble de termes avec leurs définitions, appelée aussi glossaire.
- ▶ La taxonomie. C'est un vocabulaire avec des relations de classifications entre les termes du vocabulaire.
- ▶ Le thésaurus. C'est un ensemble de termes associés à leurs définitions et avec relations entre les termes. Les relations peuvent être de synonymie, d'antonymie, de généralisation, de spécialisation et d'association.
- ▶ L'ontologie formelle. C'est un ensemble de concepts d'un domaine définis par des attributs et liés par des relations sémantiques.

En général, une ontologie se compose de:

1. Concept i.e. classe. Il désigne une notion, un objet ou une entité du domaine décrit. Un concept fait référence nécessairement à:
  - (a) Le terme ou le label syntaxique qui décrit le concept.
  - (b) L'intension i.e. la sémantique du concept définie par l'ensemble des propriétés et des attributs.
  - (c) L'extension i.e. les instances.
2. Relations: l'ensemble des associations entre les concepts.
3. Axiomes: l'ensemble des règles ou des faits qui devront être acceptés ou admis comme étant vrais. La définition des axiomes peut concerner la définition des concepts et des relations ou des restrictions concernant les valeurs des attributs, utilisée dans les inférences ou pour déduire d'autres faits.
4. Individus: les instances des concepts.

Comme tout processus d'ingénierie, la modélisation d'un savoir pour le transformer en ontologie doit obéir à une méthodologie. Il existe plusieurs méthodes de conception d'ontologies qui définissent les étapes à suivre pour réaliser une ontologie:

- ▶ La méthode de Uschold et King [180, 179],
- ▶ La méthode de Grüninger et Fox [76],
- ▶ La méthode KACTUS [101],
- ▶ La méthode SENSUS [172]
- ▶ La METHONTOLOGY [53],
- ▶ La méthode ON-TO-KNOWLEDGE [170].

Reste que dans la pratique, les praticiens savent être éclectiques et bricoler une méthodologie hybride par synthèse.

L'ontologie, l'infrastructure du Web sémantique, devrait être formulée dans des langages standardisées qui assurent l'interopérabilité, la fusion et le partage. [17] propose une architecture en couches:

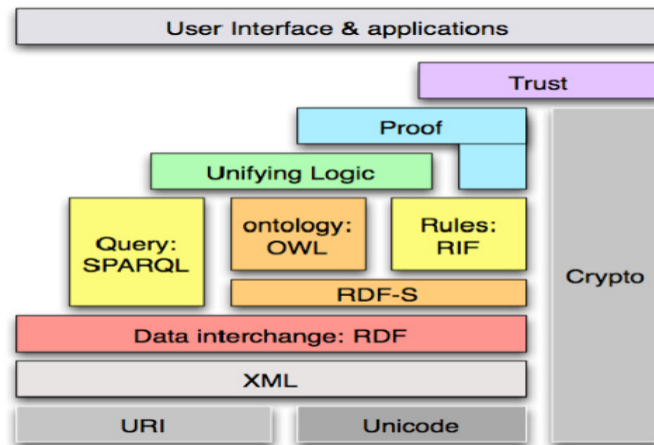


Figure 5.1: Langues du Web Sémantique [17]

Les couches basses représentent les couches syntaxiques sur lesquelles se base des couches hautes de logique et de *Proof*. La syntaxe de tout document du Web sémantique est basée sur XML basé à son tour sur le codage *Unicode* d'une part et l'utilisation des *URI* d'autre part. Les langages pour les ontologies, la représentation et l'interrogation des connaissances: RDF, RDFS, OWL, SPARQL forment la couche d'unification logique. La génération des preuves et la validation des inférences constituent la couche *Proof*. La couche *Trust* est réservée aux signatures numériques et la sécurité des données.

Les paragraphes suivants esquissent des brèves présentations de langages cités dans la figure 5.1:

1. XML. *eXtensible Markup Language* est un standard SGML du W3C, *World Wide Web Consortium* qui permet de créer des documents Web structurés en utilisant des balises imbriquées. Une représentation XML permet de structurer les données Web sans pouvoir définir des relations sémantiques entre les éléments définis d'où la naissance du langage *RDF* basé sur XML.
2. RDF. *Resource Description Framework* est un modèle de données pour décrire des ressources sur le Web, permet de rendre les ressources accessibles et utilisables par les machines et les applications.
3. RDFS. *Resource Description Framework Schema* est l'ensemble des ressources décrites en RDF utilisent un vocabulaire définissant les classes des ressources, les propriétés et leurs hiérarchies.
4. SPARQL. Acronyme récursif de *SPARQL Protocol and RDF Query Language* est le langage des requêtes pour RDF/RDFs qui représentent les ontologies publiées ou accessibles via le Web.

Les environnements de développement des ontologies permettent la modélisation, la vérification syntaxique (compilation) et la visualisation de la structure des ontologies. Le choix d'un outil dépend de la méthodologie de conception, du type d'ontologie et de la présence d'une ou plusieurs fonctionnalités exigés par le cahier de charges du projet. Il existe plusieurs environnements dont :

- ▶ Protégé est un éditeur d'ontologies libre, gratuit et extensible. Il dispose des API Java. Il s'offre sous plusieurs plateformes:
  - ▶ Protégé-Frame : c'est un environnement de développement qui permet de construire des ontologies à base de frame implémentant ainsi un modèle de connaissances compatible avec *Open Knowledge Base Connectivity protocol*, *OKBC*. Une ontologie est alors conçue sous forme des classes hiérarchiques. Chaque classe représente un concept du domaine représenté. Les facettes représentent les attributs, les relations entre les classes et les instances de chaque classe. L'ontologie peut être stockée sous différents formats : RDF, XML, HTML.
  - ▶ Protégé-OWL : c'est une extension qui supporte le langage OWL, qui permet de faire une description des classes, des propriétés et des instances, il permet de faire des inférences à partir des faits stockés et de déduire de nouveaux faits.
  - ▶ WebProtégé. Protégé reprend « le Web as Platform » et offre une plateforme Web 2.0 pour le développement en ligne des ontologies.
- ▶ OilEd est un éditeur libre développé initialement pour supporter le langage Oil, DAML+Oil. Les versions actuelles supportent les langages RDF et OWL.
- ▶ OntoEdit est un environnement de développement d'ontologies. Il utilise la méthode de conception ON-TO-KNOWLEDGE [170].
- ▶ DOE : *The Differential Ontology Editor* est un éditeur simple qui utilise la méthode de Bruno Bachimont [13].

Un *framework TripleStore* ou *DataStore* sert de SGBD pour les triplets RDF/instances des ontologies construites. Une large liste de triplestores est introduite sur <http://en.wikipedia.org/wiki/Triplestore>. Le lecteur est aussi dirigé vers [78] qui publie un *benchmark* de performance des triplestores les plus connus.

La première phase de modélisation des connaissances est l'acquisition des connaissances. Elle consiste en l'extraction des connaissances à partir des sources de l'expertise : l'expert humain et/ou les documents techniques. C'est une phase délicate vu la difficulté d'explicitement les processus mentaux d'un expert. Dans le cas de ce projet, il s'agit des connaissances communautaires partagées et généralement non documentées détenues par des praticiens communautaires. Ainsi, la tâche d'acquisition consisterait à 1) recueillir la documentation disponible sur la question et 2) concevoir une solution pour encourager la communauté à partager son expertise.

## 5.5 Documentation et cueillette du savoir ancestral

Les connaissances disponibles concernant les techniques d'irrigation traditionnelle en Tunisie se limitent à la description des aménagements hydrauliques à travers l'histoire, les techniques, les systèmes d'irrigation (Mobilisation, transport et systèmes d'irrigation). [42, 25, 145, 46]. C'est en général une description de l'infrastructure physique des systèmes d'irrigation sans considération du fonctionnement ni du savoir qui les pilotent. En réalité et à part les réseaux physiques et de leurs composantes, l'irrigation dépend de plusieurs facteurs: eau, sol, plante et facteurs climatiques (pluviométrie, vent, température et humidité). Et c'est le savoir induit par la maîtrise des connaissances concernant ces facteurs qui assure le succès de l'irrigation, l'exploitation rationnelle des ressources disponibles et le recouvrement après les périodes de sécheresse [173]. C'est un savoir diffus, non structuré et oral.

À titre comparatif, le savoir moderne sur l'irrigation se base sur les analyses physico-chimiques du sol, l'analyse chimique de l'eau, la quantification des besoins en eau d'irrigation, la quantification des réserves en eau, le dosage d'irrigation, la fréquence entre irrigations, le débit d'irrigation et le temps et la durée de l'arrosage. [126] modélise les aspects les plus importants dans des équations.

L'actuelle recherche a révélé l'absence d'une documentation qui traite des pratiques de l'irrigation. Ce constat a dicté l'obligation de procéder à une acquisition des connaissances par contact avec la communauté des agriculteurs impliqués dans l'irrigation surtout dans les zones qui ne sont pas encore touchées par l'industrialisation de travail fermier. Reste que les ressources en temps et en finances ne permettent pas de procéder à une campagne d'acquisition du savoir communautaire. Ce qui milite en faveur d'une solution évolutive basée sur les outils collaboratifs et participatifs du Web 2.0. Par conséquent, une plateforme Web 2.0 conçue pour l'acquisition du savoir communautaire sur l'irrigation et spécialement les pratiques l'irrigation traditionnelle serait le point de départ d'un ambitieux projet de modélisation du savoir. Cette plateforme cible une communauté qui s'intéresse à l'irrigation. L'expertise recherchée étant détenue par les membres de cette communauté e.g. l'agriculteur, l'ingénieur en agriculture ou en hydraulique ou le chercheur dans ces domaines. Le but ultime serait la production d'une ontologie de l'irrigation traditionnelle.

Les environnement libres pour le développement de plateformes Web collaboratives sont multiples et variées. La figure 5.2 en affiche les plus connus.

Outil	Editeur	Propriétés
<b>Drupal</b>	Dries Buytaert	CMS utilisé avec les serveurs WAMP, MAMP, LAMP, développé avec PHP. En plus de modules classiques, il englobe un module pour la gestion de connaissances, tagging social et la création de taxonomies, robuste et sécurisé
<b>eZPublish</b>	eZ	CMS utilisé avec le server Apache et lighttpd. Contient les modules standards d'un CMS.
<b>Jahia</b>	Jahia	CMS et un système de gestion documentaire développé avec java, se base sur des frameworks open source (Hibernate interface user, import export XML) supporte la base de connaissances Dublin Core.
<b>Joomla</b>	Joomla Project Team	CMS écrit en PHP utilise la base de données MySQL. Les articles joomla sont classés en catégories et les catégories en sections. Les extensions se font à travers l'ajout des composants et les modules joomla.
<b>Liferay</b>	Liferay	Portail de gestion de contenu écrit en java, s'appuie sur un serveur d'application JEE et utilise les EJB'. La solution présente 3 produits LiferaySocial Office (collaboration sociale), Liferay Portal (solution pour l'entreprise) et liferaySync (synchroniser les éléments de portail avec un contenu local)
<b>Portaneo</b>	Portaneo	Portail open source permettant la gestion documentaire, espaces collaboratifs et intranet éditorial.
<b>Silverpeas</b>	Silverpeas	Permet de créer des portails collaboratifs écrits en java JEE. Il présente plusieurs fonctionnalités : gestion d'utilisateurs, gestion de documents, moteur de workflow, notification et versionning.
<b>Spip</b>	Spip	CMS basé sur PHP et MySQL, gère le multilinguisme
<b>Typo 3</b>	Ameos	CMS écrit en PHP, utilisé avec le serveur APACHE ou IIS, se base sur les plugins permettant une évolution rapide, présente plusieurs fonctionnalités comme le LTS ( Long Term Support) pour les entreprises possédant de cycles de mise à jour long.
<b>Wordpress</b>	WordPress Foundation	Ecrit en PHP se base sur MySQL. Utilisé au début comme moteur de blog puis étendu comme CMS. Il s'agit d'une solution simple à utiliser et intuitive par rapport à Drupal et joomla.

Figure 5.2: Plateformes du Web Collaboratif[195].

L'application a essentiellement besoin d'un outil pour l'édition et la publication de contenu *Content Management Systems, CMS*. Drupal, Joomla et Wordpress sont des CMS qui proposent des riches fonctionnalités et sont d'un déploiement aisé. Les études comparatives de deux CMS Drupal et Joomla ont prouvés que Drupal est plus performant que Joomla en termes de rapidité et de sécurité. Drupal gère aussi les taxonomies et permet les tagging des connaissances pour les transformer en folksonomies.

Ainsi, Drupal fut choisi pour le développement de la plateforme. Le *tagging* social permettra de réaliser des taxonomies qui serviront comme base de connaissances enrichissant le dépôt de connaissance qui va être augmenté cumulativement.

L'environnement et l'infrastructure déployés lors de développement de la plateforme ainsi que le type et l'adresse d'hébergement utilisés sont les suivants:

- Drupal Version 7.22 comme CMS,
- Apache 2.2 comme serveur Web,
- MySQL 5.1 comme serveur de Base de Données

À titre expérimental et temporel, l'application sera hébergée en mutuelle par <http://think4all.com/drupal7/>

### 5.5.1 Plateforme développée

La publication sur le Web est une arme à double tranchant. Exposées à l'accès public, les connaissances ancestrales peuvent être utilisées pour des fins mercantiles. Face à ces menaces, le Web possède des langages de balisage qui prennent en compte le droit d'auteur tels que eXtensible Rights Markup Language (XrML) [188], Open Digital Rights Language (ODRL)[133] et même des langages adaptés aux ressources traditionnelles, en l'occurrence Rights Markup Extensions for the Protection of Indigenous Knowledge [92].

En plus de se servir de facilités offertes par la Web, la plateforme proposée s'inspire dans sa conception du *Droit sur les Ressources Traditionnelles, DRT*) [147] et prend en compte la protection de l'héritage cognitif et culturel et les droits ancestraux à travers trois conditions majeures:

- Chaque utilisateur de la plateforme conserve ses droits sur tout contenu qu'il soumet ou publie : droit de suppression et de mise à jour
- Toute ressource publiée doit appartenir à un utilisateur et, partant, à une communauté et à une période historique bien définie
- Toute utilisation du savoir doit être agréée juridiquement par la communauté productrice du contenu

Reste qu'il faut admettre que cette protection est toujours objet d'amélioration étant donné qu'il est encore impossible de contrôler toutes les atteintes possibles aux propriétés intellectuelles.

L'architecture de la plateforme se présente comme suit:

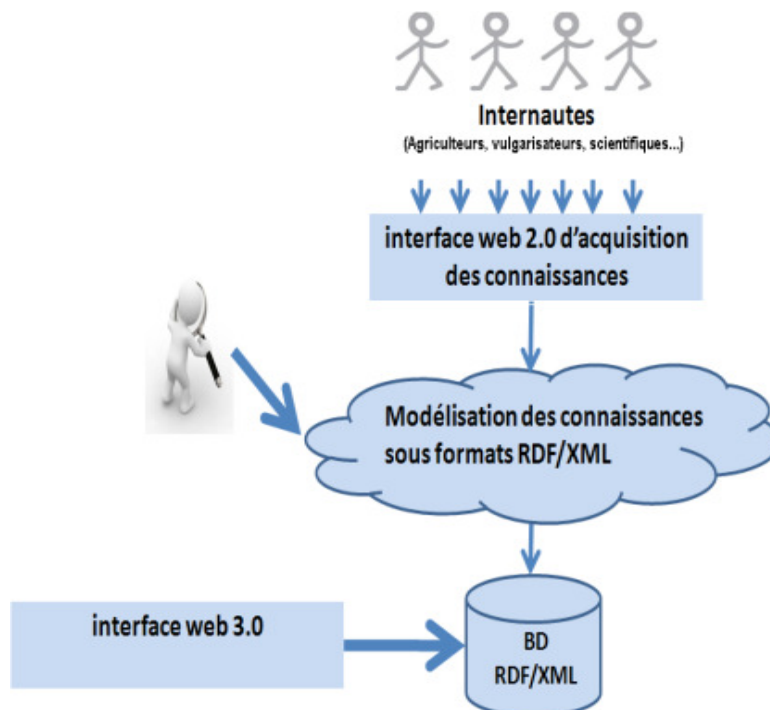


Figure 5.3: L'architecture de la plateforme [195].

Les connaissances sont acquises via des outils Web 2.0. Elles sont par la suite traitées et modélisées sous les formats RDF/XML. La persistance est assurée par une BD *TripleStore* qui sera ciblée par

les requêtes SPARQL saisies via une interface *Interface Endpoint*.

La figure 5.4 affiche le menu principal du prototype de la plateforme. Ce menu permet d'accéder aux espaces de partage multimédia concernant l'irrigation.

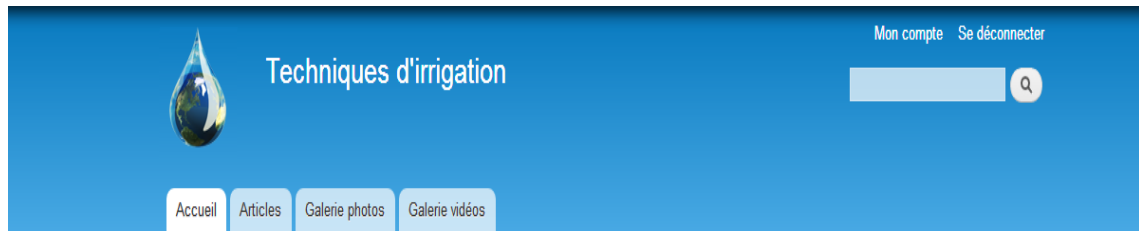


Figure 5.4: Menu principal de la plateforme collaborative[195].

La figure 5.5 montre l'ajout d'un commentaire d'un contenu partagé.



Figure 5.5: Commentaire sur contenu[195]

La figure 5.6 montre l'indexation par un ou plusieurs mots clés formant ainsi une folksonomie.

**Aménagements hydrauliques traditionnelles**

Soumis par [mounira le mer](#), 04/03/2013 - 16:15

La Tunisie présente un climat varié allant de pluvieux au nord, semi-aride a subi l'influence des peuples de la méditerranée et d'une multitude de civilisations d'origine, les numides, les systèmes d'irrigation ont été marqués par l'apport des andalous

Tags:  
[traditionnel](#) [irrigation](#)

**Bases de connaissances**

**Vocabulaire:**  
[traditionnel](#), [irrigation](#)

Figure 5.6: Tagging d'un contenu[195].

L'absence d'une documentation sur les pratiques ancestrales de l'irrigation et l'impossibilité de mener une campagne terrain pour l'acquisition du savoir a dicté le choix de commencer par la modélisation des connaissances sur les aménagements hydrauliques traditionnels puis procéder à la publication de l'ontologie sur la plateforme développée 5.5. Le document le plus complet a été rédigé par Ibn Chabbat (1221-1285) ([http://fr.wikipedia.org/wiki/Ibn\\_Chabbat](http://fr.wikipedia.org/wiki/Ibn_Chabbat)), juge et mathématicien arabe qui a inventé un ingénieux modèle de partage de l'eau dans les oasis de Sud Tunisien. La description du modèle se base sur l'étude de l'hydraulique agricole dans le Sud Tunisien [143]. Cette étude a permis d'enregistrer pour une première fois l'ensemble des règles de ce modèle. La figure 5.7 en propose un schéma dépouillé.

L'actuelle recherche est la première à transformer le contenu de l'étude en une ontologie et la rend accessible sur le Web.



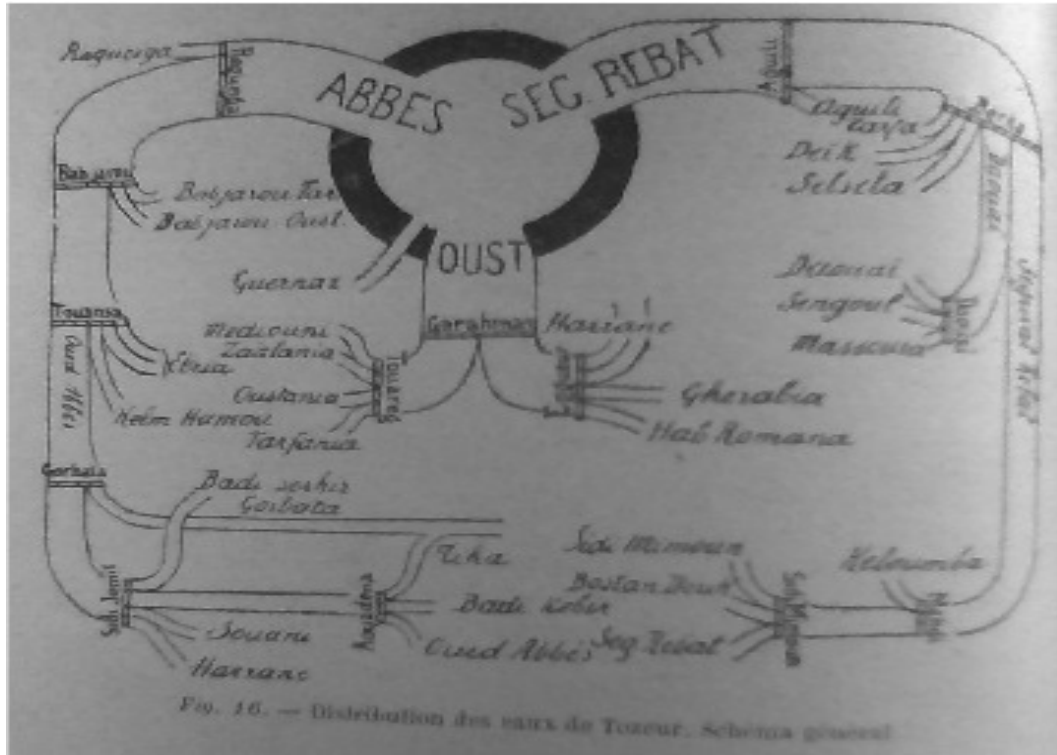


Figure 5.7: Schéma du modèle de partage d'eau d'Ibn Chabbat[143].

La recherche s'est proposée de commencer la modélisation des connaissances sur l'irrigation en Tunisie par la modélisation et la réalisation d'une ontologie des aménagements hydrauliques.

## 5.6 Modélisation des aménagements hydrauliques d'irrigation par OWL

L'ontologie des aménagements hydrauliques de l'irrigation constitue la première étape d'un ambitieux projet qui vise la modélisation de toutes les dimensions du savoir ancestral en matière d'irrigation. Le prototype de la plateforme d'acquisition de connaissances 5.5 sera activé pour compléter la tâche. L'ingénierie des connaissances portant sur les aménagements est l'objet des paragraphes suivants.

Une méthode inspirée par [180], le langage OWL 2, le logiciel *Protégé* doté du plug-in *Gravitz* sont utilisés pour la modélisation et la visualisation de l'ontologie.

La figure 5.8 montre certains des concepts identifiés par l'analyse.

Classes	Définition
<b>Amenagement_Hydraulique</b>	La classe qui abstrait les aménagements hydrauliques (utilisés pour le transport d'eau ou la mobilisation)
<b>Technique_Mobilisation</b>	Classe qui hérite de la classe mère <b>Amenagement_Hydraulique</b> qui représente les aménagements hydrauliques utilisés pour la Mobilisation d'eau : captage des sources, élevage de l'eau à partir de puits, fougara...
<b>Technique_Mobilisation_Traditionnel</b>	Classe qui représente les techniques traditionnelles de mobilisation d'eau exemple : fougara, ghout, Terrasses...etc.
<b>Technique_Mobilisation_Moderne</b>	Classe qui représente les techniques modernes de mobilisation de l'eau : puits avec pompe, grands barrages et réservoirs
<b>Technique_Transport</b>	Classe qui hérite de la classe mère <b>Amenagement_Hydraulique</b> qui représente les techniques de transport de l'eau
<b>Technique_Transport_Traditionnel</b>	Classe qui représente les techniques traditionnelles de transport de l'eau : seguia
<b>Technique_Transport_Moderne</b>	Classe qui représente les techniques modernes de transport de l'eau
<b>Systeme_Irrigation</b>	La classe qui représente la technique d'irrigation utilisé
<b>Systeme_Irrigation_Traditionnelle</b>	Une classe fille qui hérite de la classe système d'irrigation : irrigation par cuvette, goutte à goutte
<b>Systeme_Irrigation_Moderne</b>	Une classe fille qui hérite de la classe système d'irrigation : goutte à goutte
<b>Systeme_Partage_Eau</b>	Représente le système de partage d'eau dans le cas des sources d'eau communes
<b>Culture</b>	Classe représente le type de culture : Arboriculture, Palmiers, Céréales...etc.
<b>Epoque</b>	Classe qui représente l'époque historique
<b>Region</b>	Classe pour désigner la région en Tunisie
<b>Forme</b>	Classe désignant la forme géométrique de la cuvette
<b>Carre</b>	La forme carrée : sous classe de la classe Forme
<b>Cercle</b>	La forme carrée : sous classe de la

Figure 5.8: Liste partielle des concepts (classes) identifiés de l'ontologie [195].

La hiérarchie des concepts au sein de l'ontologie est représenté par la figure 5.9.

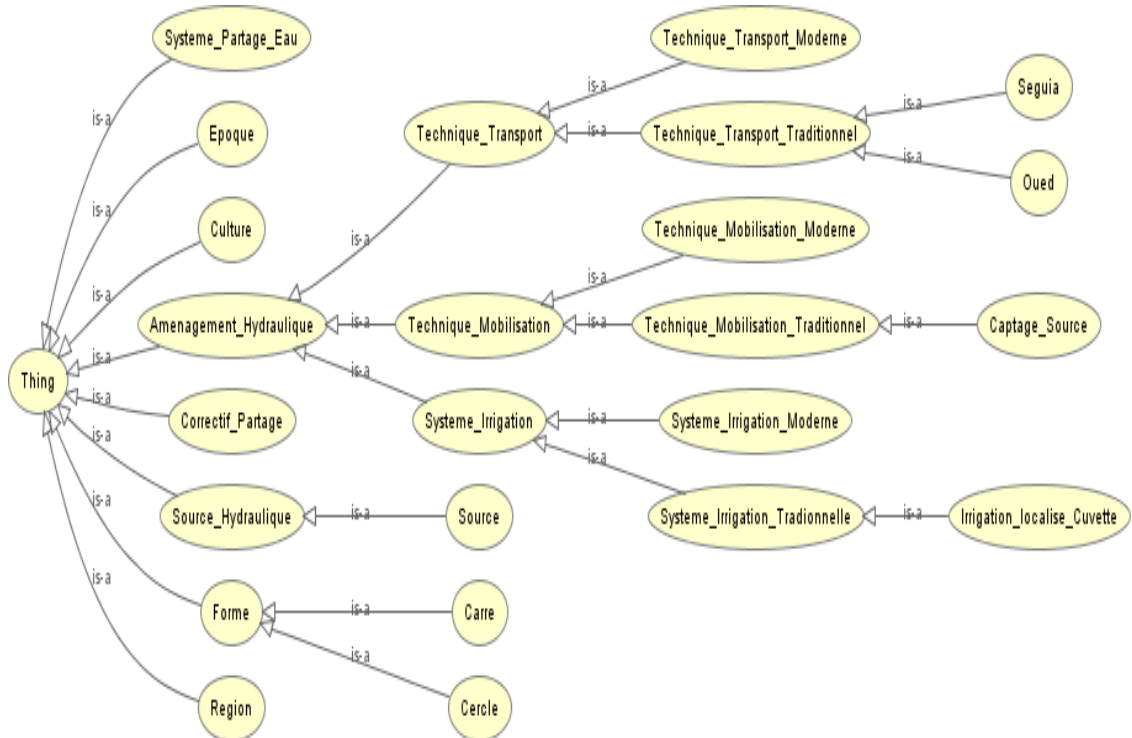


Figure 5.9: Hiérarchie des concepts de l'ontologie [195].

Comme le montre la figure 5.10, l'architecture de SPARQL utilisée pour l'interrogation de l'ontologie

réalisée est composée des modules suivants :

**Interface Endpoint** permettant aux utilisateurs de poser les requêtes SPARQL

**Une base de données TripleStore** permettant de stocker les triples RDF, il s'agit réellement d'une base de données MYSQL.

**Serveur Web** permettant de charger et stocker les connaissances RDF sur la base TripleStore, interroger la base TripleStore et envoyer les réponses aux utilisateurs sur l'interface Endpoint.

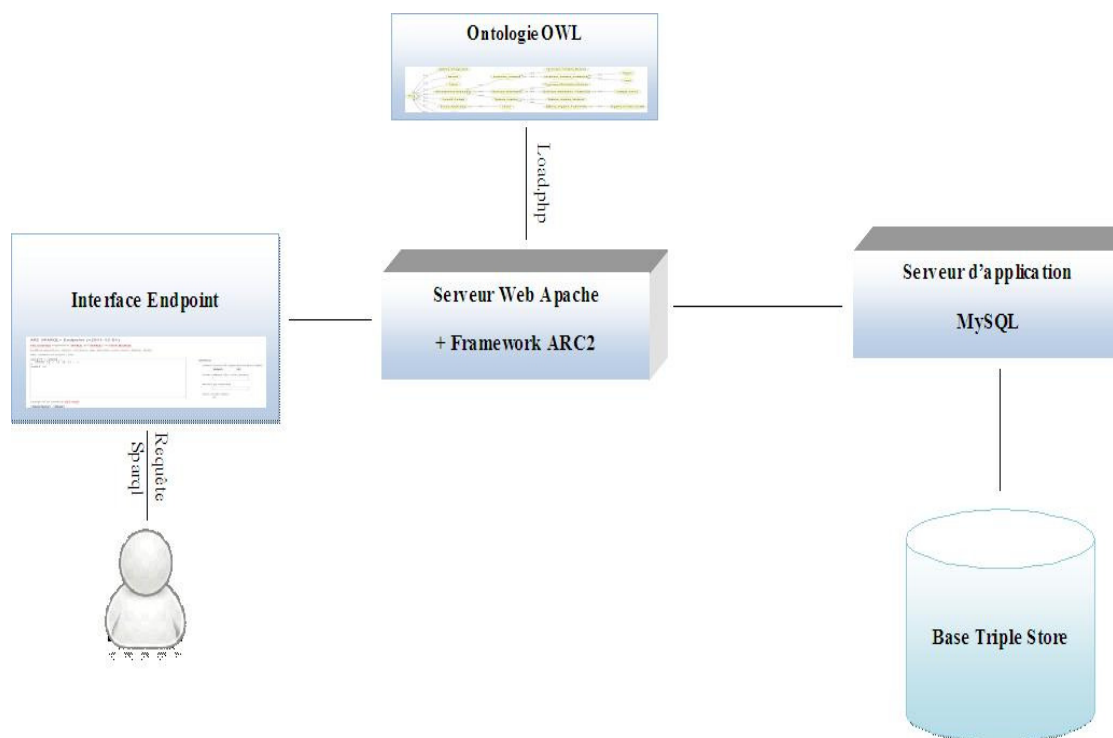


Figure 5.10: Architecture de SPARQL[195].

Après avoir alimenté l'ontologie par les instances (individus), il faut pouvoir l'interroger en se servant de SPARQL activé via une interface Web. L'interface permet aux utilisateurs de formuler et d'adresser des requêtes SPARQL et de visualiser les résultats.

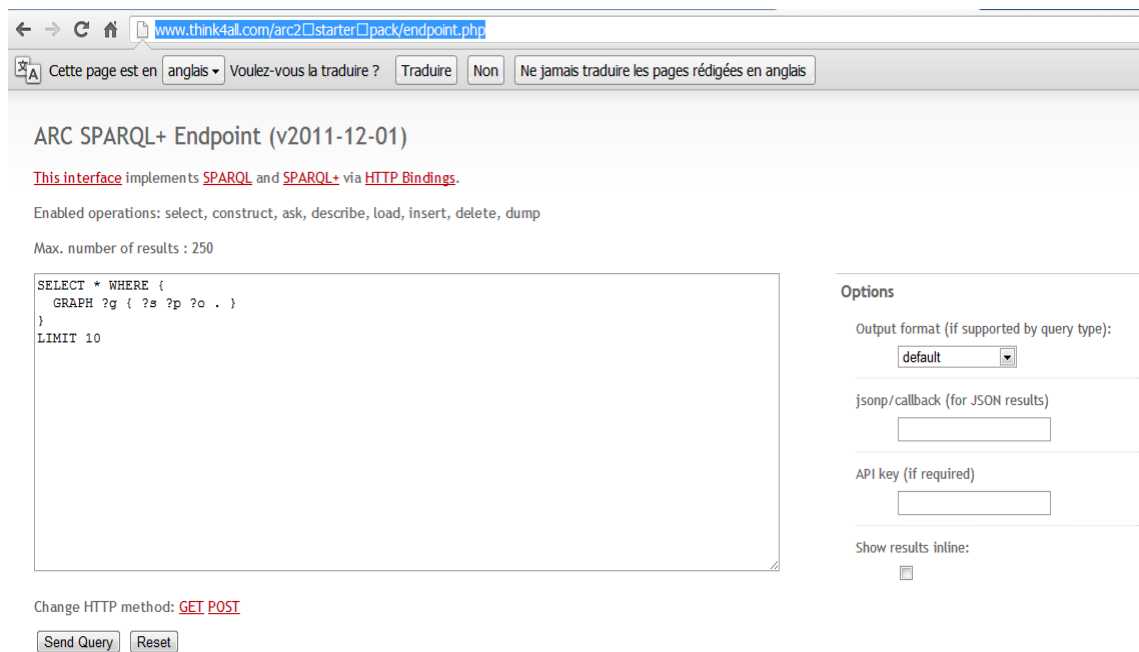


Figure 5.11: Interface EndPoint de SPARQL [195].

## 5.7 Interrogation de l'ontologie Irrigation

Les requêtes sont formulées conformément à la syntaxe SPARQL. Une fois lancée, le résultat peut être sous forme d'une table HTML, XML, Turtle, ... etc. Les exemples suivants présentent des requêtes adressées via l'interface EndPoint au triplestore de l'ontologie Irrigation.

1<sup>ère</sup> Requête: Quelles sont les classes de l'ontologie Irrigation.

Le code SPARQL de la requête s'écrit comme suit:

```
//Code SPARQL
PREFIX rdf:<http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX owl:<http://www.w3.org/2002/07/owl#>
SELECT ?c WHERE { ?c rdf:type owl:Class. }
```

La figure 5.12 représente l'écran de saisie de la requête sur les classes composantes de l'ontologie Irrigation.

## ARC SPARQL+ Endpoint (v2011-12-01)

[This interface](#) implements [SPARQL](#) and [SPARQL+](#) via [HTTP Bindings](#).

Enabled operations: select, construct, ask, describe, load, insert, delete, dump

Max. number of results : 250

```

PREFIX rdf:<http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX owl:<http://www.w3.org/2002/07/owl#>
SELECT ?c WHERE {
  ?c rdf:type owl:Class. }

```

**Options**

Output format (if supported by query type):

jsonp/callback (for JSON results)

API key (if required)

Show results inline:  
☐

Figure 5.12: Requête sur les classes de l'ontologie.

La figure 5.13 montre les résultats de la requête:

←	→	↻	www.think4all.com/arc2-starter-pack/endpoint.php?query=PREFIX+rdf%3A<http%3A%2F%2Fwww.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns%3E
Applications	Poussette combinée...	Billet avion pas cher ...	Diocèse de Tunis
			Caractéristiques de l...
			Accueil - Forum des...
			c
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Amenagement_Hydraulique
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Captage_Source
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Carre
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Cercle
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Correctif_Partage
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Culture
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Epoque
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Forme
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Irrigation_localise_Cuvette
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Oued
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Region
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Seguia
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Source
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Source_Hydraulique
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Systeme_Irrigation
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Systeme_Irrigation_Moderne
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Systeme_Irrigation_Tradionnelle
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Systeme_Partage_Eau
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Technique_Mobilisation
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Technique_Mobilisation_Moderne
			http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#Technique_Mobilisation_Traditionnel

Figure 5.13: Résultat tabulaire de la requête des classes.

- 2<sup>ème</sup> Requête: Les noms et le débit des séguias définies dans le système d'Ibn Chabbat.  
 Le code SPARQL de la requête s'écrit comme suit:

```

\\Code SPARQL
PREFIX rdf:<http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX owl:<http://www.w3.org/2002/07/owl#>

```

```

PREFIX ns:<http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#>
SELECT ?nom ?debit WHERE {
  ?x rdf:type ns:Seguia.
  ?x ns:a_nom ?nom.
  OPTIONAL{?x ns:a_debit ?debit}
}

```

La figure 5.14 présente l'interface de formulation de requête concernant le débit des rigole d'eau *seguia*.

ARC SPARQL+ Endpoint (v2011-12-01)

[This interface](#) implements [SPARQL](#) and [SPARQL+](#) via [HTTP Bindings](#).

Enabled operations: select, construct, ask, describe, load, insert, delete, dump

Max. number of results : 250

```

PREFIX rdf:<http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX owl:<http://www.w3.org/2002/07/owl#>
PREFIX ns:<http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#>

SELECT ?nom ?debit WHERE {
  ?x rdf:type ns:Seguia.
  ?x ns:a_nom ?nom.
  OPTIONAL{?x ns:a_debit ?debit}
}

```

**Options**

Output format (if supported by query type):

jsonp/callback (for JSON results)

API key (if required)

Show results inline:  
☐

Figure 5.14: Requête du débit des seguia.

La figure 5.15 affiche le résultat de la requête du débit.

nom	debit
Jerr Abbes	
Jerr Ouest	31
jerr Rebat	31

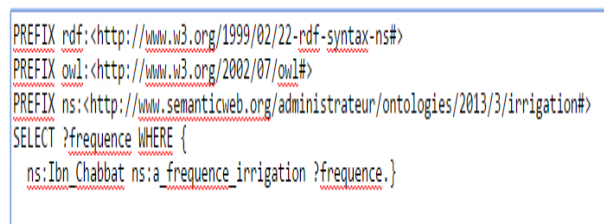
Figure 5.15: Résultat de la requête du débit des seguia.

3<sup>ème</sup> Requête: Quelle est la fréquence d'irrigation pour le système d'Ibn Chabbat (nombre de fois /semaine).

Le code SPARQL de la requête s'écrit comme suit:

```
\\Code SPARQL
PREFIX rdf:<http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX owl:<http://www.w3.org/2002/07/owl#>
PREFIX ns:<http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#>
SELECT ?frequence
WHERE { ns:Ibn_Chabbat ns:a_frequence_irrigation ?frequence.}
```

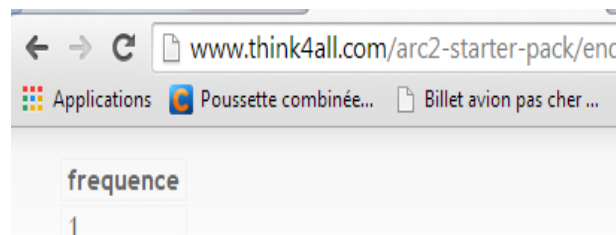
La figure 5.16 représente l'écran de saisie de la requête sur la fréquence de l'irrigation.



```
PREFIX rdf:<http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX owl:<http://www.w3.org/2002/07/owl#>
PREFIX ns:<http://www.semanticweb.org/administrateur/ontologies/2013/3/irrigation#>
SELECT ?frequence WHERE {
  ns:Ibn_Chabbat ns:a_frequence_irrigation ?frequence.}
```

Figure 5.16: Requête de fréquence d'irrigation.

La figure 5.17 affiche le résultat de la requête de la fréquence.



frequence
1

Figure 5.17: Résultat de la requête de fréquence d'irrigation.

## 5.8 Conclusion

Inspirée par l'approche Recherche-Action, orientée changement de la réalité, la recherche a contribué par une issue immédiate:

- La découverte de l'anémie documentaire portant sur le savoir ancestral en matière d'irrigation ancestrale.
- Reconnaissance de l'urgence d'une campagne de collecte du savoir autochtone dans l'absence d'une documentation pertinente.
- À défaut de ressources financières et humaines, il faut tirer profit de la technologie Web et ses outils collaboratifs.
- La réalisation du noyau d'une ontologie des aménagements hydrauliques comme début de l'ontologie ancestrale en irrigation.

- L'ontologie développée est ouverte à l'enrichissement par les apports de la communauté
- La réalisation du prototype d'une plateforme Web d'encouragement à la participation et la contribution dans la collecte de données sur l'irrigation ancestrale.

Comme issue plus lointaine, la recherche a permis:

- La réhabilitation du savoir ancestral, sa reconsidération et la rehausse de sa valeur utilitaire.
- L'approfondissement de la conscience collective et son implication active dans la sauvegarde du savoir traditionnel.
- La nécessité d'organiser la contribution systématique des experts locaux dans tout projet de modélisation.
- Somme toute, la modélisation reste encore l'œuvre d'experts d'où la communauté locale est exclue. L'opacité des procédures appliquées pour la modélisation génère l'aliénation des locaux. Pour faciliter la participation des autochtones et améliorer sa qualité, il faut développer des outils de modélisation transparents adaptés au contexte communautaire tant au niveau culturel qu'au niveau éducatif.

Finalement, il reste à:

- améliorer l'interface du prototype de la plateforme de participation. Une approche consiste à offrir à chaque participant un interface personnalisée selon son profil d'utilisateur[96, 67].
- mettre en œuvre l'ensemble des protocoles de protection des droits d'auteur des autochtones pour à la fois assurer la paternité du savoir et encourager une participation de qualité.
- engager des recherches dans les archives des manuscrits des siècles passées et dans les collections privées afin de découvrir des ouvrages sur le savoir de l'irrigation et qui ont échappé à la publication.



# Chapitre 6

## Contribution à la modélisation spatio-temporelle: Conclusion et Perspectives

Les activités de recherche n'ont pas cessé même si elles ne sont pas constamment couronnées par de publications. Somme toute, le choix des axes de recherche fut pertinent et les résultats sont effectivement promoteurs. Des riches veines sont identifiées et les projets de master et thèses vont certainement se multiplier une fois le droit administratif de direction et d'encadrement m'est acquis. Ainsi, l'intention porte sur la consolidation des fronts suivants:

► Recherches entamées depuis septembre 2014:

- 1) RCSF, *Crowdsourcing* et Ontologies. La technologie RCSF fait émerger des nouvelles perspectives et des nouveaux défis. Les dispositifs de collecte de données se diversifient et s'humanisent e.g. *human sensors*. Les données sont produites en quantité volumineuse. En amont du processus, la question de la persistance des données se pose avec acuité. En aval, la contraintes de la qualité des données détermine le retour sur investissement par l'exploitation et définit par ricochet les termes de l'interopérabilité entre les mines et sources d'information. Pour un observateur externe, il existe une sorte de chaos numérique qui empêche d'optimiser les bénéfices des avancées technologique.
- a) Ontologie pour la qualité des données spatiales. L'équipe CONTOS<sup>2</sup> soutient l'hypothèse que des filtres sémantiques appliqués aux données recueillies par RCSF *crowdsourcing*, identifient et organisent le contenu pour l'usage à quoi il est destiné et éliminent le produit de mauvaise qualité. Dans ce cadre, l'introduction des ontologies i.e. sémantiques formelles, dans la collecte et la détermination de la qualité des données spatiales, s'impose comme tendance actuelle de recherche. À ce titre, une thèse de doctorat en co-direction portant sur l'utilisation des ontologies comme support pour la qualification des données spatiales recueillies par *crowdsourcing* de RCSF a été lancée depuis l'automne 2014. L'issue attendue serait une plateforme SpatialOntoWeb qui offre des services de validation des données recueillies sur la base d'une validation référencée par une ontologie de la qualité normalisée.

- b) Système multi-agent, *SMA* pour la qualité des données spatiales. Les *SMA* offrent des services autonomes d'intelligence distribuée. L'équipe CONTOS<sup>2</sup> soutient l'hypothèse qu'un *SMA* dotée des règles d'inférence sémantique supportée par une ontologie peut servir dans la validation et la détermination à la source de la qualité des données recueillies par *crowdsourcing* de RCSF. Ainsi, une thèse de doctorat en co-direction portant sur cette problématique fut lancée depuis l'automne 2014. L'issue attendue serait un RCSF où les *notes* sont investis par des agents autonomes qui décident à la source de la qualité d'une donnée pré et post-acquisition.
- 2) Modélisation 3D géo-spatiale. Un ex-membre de l'équipe CONTOS<sup>2</sup> a déjà réalisé une recherche niveau master portant sur la modélisation 3D temporelle avec CityGML [120]. L'intention est de creuser encore cette veine afin d'aboutir à une plateforme de modélisation 3D géo-temporelle générique. L'objectif est d'offrir un outil de modélisation qui représente le construit historique dans les détails de sa sémantique architecturale, esthétique, fonctionnelle et utilitaire et le reproduit en visuel numérique le plus fidèle possible à la réalité d'origine. Il s'agirait au fait de concevoir un *framework CityGML générique* capable de décrire les composantes architecturales et urbaines et de rendre compte de leur dynamisme à travers les âges. Une thèse de doctorat en co-direction portant sur cette problématique fut lancée depuis l'automne 2014.

► Projets de recherches futurs:

- 1) Modélisation des connaissances et Web sémantique. Beaucoup d'encre a coulé concernant le besoin de révéler le signifié du chaos symbolique du Web en le transformant en Web sémantique. L'équipe CONTOS<sup>2</sup> a déjà participé par une recherche de niveau master portant sur la modélisation des connaissances ancestrales de l'irrigation. Le *Ontology Web Language*, *OWL* fut utilisé pour construire manuellement une ontologie en exploitant un ouvrage rédigé au Moyen-Âge. L'ontologie fut intégrée au Web. Elle est offerte à la consultation par les outils d'interrogation sémantique [195]. L'intention est de creuser encore cette veine afin d'aboutir à des outils d'extraction d'ontologie de la documentation textuelle disponible. Le récit de voyage d'*Ibn Battouta* serait une matrice enceinte d'ontologies spatio-temporelles qu'il faut aider à accoucher.
- 2) Révélation et spatialisation du contenu du Wikipedia arabe. Le Wikipedia arabe est une riche source d'information sur le comportement cognitif déterminé par l'appartenance régionale. L'étude du contenu créé par les contributions arabes devrait, par une analyse spatiale, révéler des *patterns* intellectuels inédits. Les résultats pourraient suggérer des éléments de réponse au manque de la participation arabe à la production scientifique numérique.
- 3) Bases de données à instances. La modélisation conceptuelle de données organise les entités qui peuplent un domaine en classes. Reste qu'il est fréquent d'oublier que ces processus de modélisation laissent échapper des entités que refusent l'appartenance à l'ensemble des classes identifiées: ces sont les instances rebelles. Sans ces instances, la sémantique intégrée dans la base de données est boiteuse. Il serait intéressant de se pencher sur des cas

concrets d'entités rebelles et de proposer des moyens pour les faire couvrir par le modèle des données conceptuel ou logique. Le défi serait de se servir d'entités spatio-temporelles.

- 4) Outils Web de participation citoyenne, *ITC4Participation*. Les outils du Web 2.0 ont permis aux internautes d'acquérir le statut de producteur de contenu avec lequel ils contribuent sur les réseaux sociaux. L'hypothèse est que cette contribution peut-être transformée en participation politique dans la chose publique. La participation citoyenne est considérée le garant pour que la démocratie naissance en Tunisie ne sombre dans le désintérêt après les premières années d'enthousiasme. Les expériences de démocratie de façade que vivent plusieurs peuples ne peuvent être évités qu'en gardant vif l'espoir que le point de vue et les intérêts des citoyens soient respectés lors de la prise de décision. Pour atteindre cet objectif, il serait intéressant de concevoir et implémenter des outils collaboratifs permettant d'asseoir une tradition de démocratie participative.

# Bibliographie

- [1] 3DCityDatabase. 3dcitydatabase home page. <http://www.3dcitydb.net/3dcitydb/welcome/>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [2] 3DGIS cityvu 3DGIScityvu. 3dgiscityvu home page. <http://www.3dgis.it/it/prodotti/visualizzazione-tridimensionale-di-dati-geografici/>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [3] Tamas Abraham and John F Roddick. Survey of spatio-temporal databases. *GeoInformatica*, 3(1):61–99, 1999.
- [4] Chunyu Ai, Ruiying Du, Minghong Zhang, and Yingshu Li. In-network historical data storage and query processing based on distributed indexing techniques in wireless sensor networks. In *Wireless Algorithms, Systems, and Applications*, pages 264–273. Springer, 2009.
- [5] Mesut Akdere. The action research paradigm: an alternative approach in negotiation. *Systemic practice and action research*, 16(5):339–354, 2003.
- [6] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 38(4):393–422, 2002.
- [7] Lina AlJadir. Sensor Network Databases An Introduction. *Advanced Research Topics in Databases Summer*, 2005, 2004.
- [8] James F Allen. Towards a general theory of action and time. *Artificial intelligence*, 23(2):123–154, 1984.
- [9] James F Allen. Time and time again: The many ways to represent time. *International Journal of Intelligent Systems*, 6(4):341–355, 1991.
- [10] Per Andersen. *What is Web 2.0?: ideas, technologies and implications for education*, volume 1. JISC Bristol, UK, 2007.
- [11] Aristoteles Viewer 3D Aristoteles3D. Aristoteles 3d home page. <http://www.geo-kiosk.net/explore-3dgeo/>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [12] Lucie Audet. Wikis, blogues et web 2.0: Opportunités et impacts pour la formation à distance. *documento en línea*. < <http://www.educnet.education.fr/dossier/travail-apprentissage-collaboratifs/bibliographie>, 2010.

- [13] Bruno Bachimont. Engagement sémantique et engagement ontologique: conception et réalisation d'ontologies en ingénierie des connaissances. *Ingénierie des connaissances: évolutions récentes et nouveaux défis*, pages 305–323, 2000.
- [14] Mark Barnes and Ellen Levy Finch. Collada 2008,digital asset schema release 1.5.0 specifications. *Sony Computer Entertainment Inc*, April 2008.
- [15] Fikret Berkes. Traditional ecological knowledge in perspective. *Traditional ecological knowledge: Concepts and cases*, pages 1–9, 1993.
- [16] Tim Berners-Lee, Mark Fischetti, and Michael L Foreword By-Dertouzos. *Weaving the Web: The original design and ultimate destiny of the World Wide Web by its inventor*. HarperInformation, 2000.
- [17] Tim Berners-Lee, James Hendler, Ora Lassila, et al. The semantic web. *Scientific american*, 284:28–37, 2001.
- [18] Shah Bhatti, James Carlson, Hui Dai, Jing Deng, Jeff Rose, Anmol Sheth, Brian Shucker, Charles Gruenwald, Adam Torgerson, and Richard Han. MANTIS OS: An embedded multi-threaded operating system for wireless micro sensor platforms. *Mobile Networks and Applications*, 10(4):563–579, 2005.
- [19] Françoise de Blomac. Ushahidi en haïti: encore des leçons à tirer, 2012.
- [20] Jean Bonafé-Schmitt. Les médiations, 1997.
- [21] Maged NK Boulos. Web gis in practice iii: creating a simple interactive map of england's strategic health authorities using google maps api, google earth kml, and msn virtual earth map control. *International Journal of Health Geographics*, 4:22, 2005.
- [22] Maged NK Boulos and Kiyoshi Honda. Web gis in practice iv: publishing your health maps and connecting to remote wms sources using the open source umn mapserver and dm solutions maplab. *International Journal of Health Geographics*, 5(1):6, 2006.
- [23] Gernot Brodnig and Viktor Mayer-Schonberger. Bridging the gap: the role of spatial information technologies in the integration of traditional environmental knowledge and western science. *The Electronic Journal of Information Systems in Developing Countries*, 1, 2000.
- [24] Arne Bröring, Johannes Echterhoff, Simon Jirka, Ingo Simonis, Thomas Everding, Christoph Stasch, Steve Liang, and Rob Lemmens. New generation sensor web enablement. *Sensors*, 11:2652–2699, 2011.
- [25] C Brouwer, K Prins, M Kay, and M Heibloem. Méthodes d'irrigation. *Gestion des Eaux en Irrigation. Manuel de Formation*, 1990.
- [26] Johannes Hendricus Antonius Maria Brouwers. *Rural people's response to soil fertility decline: the Adja case (Benin)*. Agricultural University, 1993.

- [27] Talal Ashraf Butt, Iain Phillips, Lin Guan, and George Oikonomou. Trendy: An adaptive and context-aware service discovery protocol for 6lowpans. In *Proceedings of the Third International Workshop on the Web of Things*, page 2. ACM, 2012.
- [28] Zhi-yue Cao and Yue Liu. An object-oriented spatio-temporal data model [j]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 1:021, 2002.
- [29] Cinzia Cappiello, Florian Daniel, Maristella Matera, Matteo Picozzi, and Michael Weiss. Enabling end user development through mashups: requirements, abstractions and innovation toolkits. In *End-User Development*, pages 9–24. Springer, 2011.
- [30] Antonio Carzaniga, Koorosh Khazaei, and Fabian Kuhn. Oblivious low-congestion multicast routing in wireless networks. In *Proceedings of the thirteenth ACM international symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pages 155–164. ACM, 2012.
- [31] Emmanuel Cecchet, Anupam Chanda, Sameh Elnikety, Julie Marguerite, and Willy Zwaenepoel. Performance comparison of middleware architectures for generating dynamic web content. In *Proceedings of the ACM/IFIP/USENIX 2003 International Conference on Middleware*, pages 242–261. Springer-Verlag New York, Inc., 2003.
- [32] Dong Chen, Guiran Chang, Jiajia Li, and Jie Jia. Study on the interconnection architecture and access technology for internet of things. In *Computer Science and Service System (CSSS), 2011 International Conference on*, pages 1744–1748. IEEE, 2011.
- [33] Jun Chen and Jie Jiang. An event-based approach to spatio-temporal data modeling in land subdivision systems. *GeoInformatica*, 4(4):387–402, 2000.
- [34] Nicholas Chrisman. *Exploring Geographical Information Systems*. Wiley, 2001.
- [35] Citygml4j. Citygml4j github. <https://github.com/citygml4j>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [36] Christophe Claramunt and Bin Jiang. An integrated representation of spatial and temporal relationships between evolving regions. *Journal of geographical systems*, 3(4):411–428, 2001.
- [37] Walter Colitti, Kris Steenhaut, and Niccolò De Caro. Integrating wireless sensor networks with the web. *Extending the Internet to Low power and Lossy Networks (IP+ SN 2011)*, 2011.
- [38] Contiki. Contiki home page. <http://contiki.sourceforge.net/docs/2.6/>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [39] Roger L Costello et al. Rest (representational state transfer). *last updated Jun*, 26, 2002.
- [40] Patrick d’Aquino. Empowerment et participation: comment mieux cadrer les effets possibles des démarches participatives? proposition d’un cadre d’analyse à partir d’une synthèse bibliographique, 2007.
- [41] Jean-Marc Dziedzicki. *Gestion des conflits d’aménagement de l’espace: quelle place pour les processus de médiation?* PhD thesis, Université de Tours, 2001.

- [42] Sl El Amami et al. *Les aménagements hydrauliques traditionnels en Tunisie*. Centre de Recherche du Genie Rural, 1984.
- [43] Jeremy Elson and Deborah Estrin. Sensor networks: a bridge to the physical world. In *Wireless sensor networks*, pages 3–20. Springer, 2004.
- [44] Elyx3D. Elyx3d home page. <http://1spatial.com/products-services/elyx/elyx-gis-platform/elyx-3d>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [45] Antonia Engel and Benedikt Korf. Les techniques de négociation et de médiation appliquées à la gestion des ressources naturelles, 2006.
- [46] Nouredine Ennabli. *L'irrigation en Tunisie*. Institut national agronomique de Tunisie, Département de génie rural, des eaux et des forêts, 1995.
- [47] Martin Erwig, Ralf Hartmut Gu, Markus Schneider, Michalis Vazirgiannis, et al. Spatio-temporal data types: An approach to modeling and querying moving objects in databases. *GeoInformatica*, 3:269–296, 1999.
- [48] Martin Erwig, Ralf Hartmut Güting, Markus Schneider, and Michalis Vazirgiannis. Abstract and discrete modeling of spatio-temporal data types. In *Proceedings of the 6th ACM international symposium on Advances in geographic information systems*, pages 131–136. ACM, 1998.
- [49] Environmental Systems Research Institute ESRI. Esri home page. <http://www.esri.com/>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [50] K. Fathallah, A. Frihida, and N. Ben Haj-Alouane. Wireless sensor network queries processors: A survey. In *International Conference on Information Processing and Wireless Systems (IP-WIS-2013)*, Djerba, Tunisia, March, 21-24, 2013.
- [51] K. Fathallah, A. Frihida, L. Ben Saad, N. Ben Haj-Alouane, and B. Tourancheau. Qlowpan: A queries processor over rpl/6lowpan based sensors networks. In *International Conference on Automation, Control, Engineering & Computer Science (ACECS'14)*, Sousse - Tunisia., March, 22-25, 2014.
- [52] Karim Fathallah, Zied Bouzghaya, Karim Foughali, and Ali Frihida. Using Wireless Sensor Networks as an Early Warning Systems for Landsliding (EWSL). In *Proceedings of the First International Conference on Landslides' Risk*, volume 1, pages 365–372, March 14-16 2013.
- [53] Bernard Ferries. Maquettes numériques des bâtiments et des territoires : Interopérabilité progresse. *Building Smart, International Alliance for Interoperability*, 2007.
- [54] Daniel J Fiorino. Citizen participation and environmental risk: A survey of institutional mechanisms. *Science, technology & human values*, 15(2):226–243, 1990.
- [55] Chien-Liang Fok, G Roman, and Chenyang Lu. Mobile agent middleware for sensor networks: An application case study. In *Information Processing in Sensor Networks, 2005. IPSN 2005. Fourth International Symposium on*, pages 382–387. IEEE, 2005.

- [56] Luca Forlizzi, Ralf Hartmut Güting, Enrico Nardelli, and Markus Schneider. *A data model and data structures for moving objects databases*, volume 29. ACM, 2000.
- [57] Michel Foucault. *L’archéologie du savoir*. paris: Gallimard; 1969. *Currently being translated to English by Sheridan Smith AM. The Archeology of Knowledge New York: Pantheon Books, 1972.*
- [58] William J Frawley, Gregory Piatetsky-Shapiro, and Christopher J Matheus. Knowledge discovery in databases: An overview. *AI magazine*, 13(3):57, 1992.
- [59] Michael Friendly and Daniel J Denis. Milestones in the history of thematic cartography, statistical graphics, and data visualization. *Seeing Science: Today American Association for the Advancement of Science*, 2008.
- [60] Ali Frihida, Danielle J Marceau, and Marius Theriault. Spatio-Temporal Object-Oriented Data Model for Disaggregate Travel Behavior. *Transactions in GIS*, 6(3):277–294, 2002.
- [61] Ali Frihida, Danielle J Marceau, and Marius Thériault. Dimension temporelle et modélisation d’une animation cartographique dans un sig orienté objet. *Revue internationale de géomatique*, 13:107–127, 2003.
- [62] Ali Frihida, Danielle J. Marceau, and Marius Thériault. Development of a temporal extension to query travel behavior time paths using an object-oriented GIS. *GeoInformatica*, 8(3):211–235, 2004.
- [63] Ali Frihida, Danielle J Marceau, and Marius Thériault. Extracting and visualizing individual space-time paths: an integration of gis and kdd in transport demand modeling. *Cartography and Geographic Information Science*, 31(1):19–28, 2004.
- [64] Ali Frihida, Donia Zheni, Henda Ben Ghezala, and Christophe Claramunt. Modeling trajectories: A spatio-temporal data type approach. In *Proceedings - International Workshop on Database and Expert Systems Applications, DEXA*, pages 447–451, 2009.
- [65] Mark Gahegan, Monica Wachowicz, Mark Harrower, and Theresa-Marie Rhyne. The integration of geographic visualization with knowledge discovery in databases and geocomputation. *Cartography and Geographic Information Science*, 28(1):29–44, 2001.
- [66] Ixent Galpin, Christian YA Brenninkmeijer, Alasdair JG Gray, Farhana Jabeen, Alvaro AA Fernandes, and Norman W Paton. Snee: a query processor for wireless sensor networks. *Distributed and Parallel Databases*, 29:31–85, 2011.
- [67] Susan Gauch, Mirco Speretta, Aravind Chandramouli, and Alessandro Micarelli. User profiles for personalized information access. In *The adaptive web*, pages 54–89. Springer, 2007.
- [68] Johannes Gehrke and Samuel Madden. Query processing in sensor networks. *IEEE Pervasive Computing*, 3(1):46–55, 2004.
- [69] Robert L Glass, Venkataraman Ramesh, and Iris Vessey. An analysis of research in computing disciplines. *Communications of the ACM*, 47(6):89–94, 2004.



- [70] Lukasz Golab and M Tamer Özsu. Issues in data stream management. *ACM Sigmod Record*, 32(2):5–14, 2003.
- [71] R Govindan. Data Centric Routing and Storage in Sensor Networks. *Wireless Sensor Network*, pages 185–205, 2004.
- [72] S Gowrishankar, TG Basavaraju, DH Manjaiah, and Subir Kumar Sarkar. Issues in wireless sensor networks. In *Proceedings of the World Congress on Engineering*, volume 1, pages 978–988, 2008.
- [73] Pierre Grenon and Barry Smith. SNAP and SPAN: Towards dynamic spatial ontology. *Spatial cognition and computation*, 4(1):69–104, 2004.
- [74] Thomas R Gruber. A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge acquisition*, 5:199–220, 1993.
- [75] Stéphane Grumbach, Philippe Rigaux, and Luc Segoufin. Spatio-temporal data handling with constraints. *GeoInformatica*, 5(1):95–115, 2001.
- [76] Michael Grüninger and Mark S Fox. Methodology for the design and evaluation of ontologies. *CiteSeer*, 1995.
- [77] Yaniss Guigoz, Gregory Giuliani, and Nicolas Ray. State of the art in open-source gis and sdi. [http://arpegeo.sci.am/Pdfs/2013\\_workshop\\_presentations/YG\\_opensource\\_GIS\\_SDI.pdf](http://arpegeo.sci.am/Pdfs/2013_workshop_presentations/YG_opensource_GIS_SDI.pdf). Page consultée le 29/11/2014.
- [78] Yuanbo Guo, Zhengxiang Pan, and Jeff Heflin. Lubm: A benchmark for owl knowledge base systems. *Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web*, 3:158–182, 2005.
- [79] Hartmut Güting, Teixeira de Almeida, and Zhiming Ding. Modeling and querying moving objects in networks. *The VLDB Journal—The International Journal on Very Large Data Bases*, 15:165–190, 2006.
- [80] Ralf Hartmut Güting, Thomas Behr, Victor Almeida, Zhiming Ding, Frank Hoffmann, Markus Spiekermann, and LG Datenbanksysteme für neue Anwendungen. *SECONDO: An extensible DBMS architecture and prototype*. FernUniversität, Fachbereich Informatik, 2004.
- [81] Ralf Hartmut Güting, Michael H Böhlen, Martin Erwig, Christian S Jensen, Nikos A Lorentzos, Markus Schneider, and Michalis Vazirgiannis. A foundation for representing and querying moving objects. *ACM Transactions on Database Systems (TODS)*, 25:1–42, 2000.
- [82] Ralf Hartmut Güting and Markus Schneider. *Moving objects databases*. Elsevier, 2005.
- [83] GvSIG. gvsig portal. <http://www.gvsig.org/web/>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [84] T. Hägerstrand. What about people in regional science ? *Papers of the Regional Science Association*, 24:6–21, 1970.

- [85] Pierre Hamel. La consultation publique et les limites de la participation des citoyens aux affaires urbaines. *Recherches sociographiques*, 40:435–466, 1999.
- [86] Gillian R Hayes. The relationship of action research to human-computer interaction. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 18(3):15, 2011.
- [87] Erik Hazzard. *Openlayers 2.10 beginner’s guide*. Packt Publishing Ltd, 2011.
- [88] Wendi B Heinzelman, Amy L Murphy, Hervaldo S Carvalho, and Mark A Perillo. Middleware to support sensor network applications. *Network, IEEE*, 18:6–14, 2004.
- [89] Karen Henricksen and Ricky Robinson. A survey of middleware for sensor networks: state-of-the-art and future directions. In *Proceedings of the international workshop on Middleware for sensor networks*, pages 60–65. ACM, 2006.
- [90] Rudy Hirschheim and Heinz K Klein. Information systems research at the crossroads: External versus internal views. In *Organizational and social perspectives on information technology*, pages 233–254. Springer, 2000.
- [91] Jonathan Hui and Richard Kelsey. Multicast forwarding using trickle. *draft-ietf-roll-trickle-mcast-00 (work in progress)*, 2011.
- [92] Jane Hunter. Rights markup extensions for the protection of indigenous knowledge. In *Global Communities Track, World Wide Web Conference 2002*, 2002.
- [93] Jane Hunter, Bevan Koopman, and Jane Sledge. Software tools for indigenous knowledge management. In *Museums and the Web 2003*, 2003.
- [94] Internet Engineering Task Force IETF. The internet engineering task force (ietf). <https://www.ietf.org/>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [95] International Organization for Standardization ISO. International organization for standardization home page. <http://www.iso.org/iso/home/>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [96] Melody Y Ivory and Marti A Hearst. The state of the art in automating usability evaluation of user interfaces. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 33(4):470–516, 2001.
- [97] Farhana Jabeen, Sarfraz Nawaz, Sadaf Tanveer, and Majid Iqbal. Spatio-Temporal Query Processing Over Sensor Networks: Challenges, State Of The Art And Future Directions. *TIIS*, 6(7):1756–1776, 2012.
- [98] Musa Jafar, Russell Anderson, and Amjad Abdullat. Comparison of dynamic web content processing language performance under a lamp architecture, 2008.
- [99] Java Architecture for XML Binding Jaxb. Jaxb home page. <https://jaxb.java.net/>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [100] Martha Johnson. *Lore: capturing traditional environmental knowledge*. Diane Publishing, 1998.
- [101] Consortium Kaktus et al. The kactus booklet. *ESPRIT Project*, 1996.

- [102] Mansour Khayati. Masterthesis: Conception et implantation d'une application webgis pour la résolution d'un conflit d'aménagement urbain. Master's thesis, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie, 11 2013.
- [103] Raymes Khoury, Tim Dawborn, Bulat Gafurov, Glen Pink, Edmund Tse, Quincy Tse, K Almi'Ani, Mohamed Gaber, Uwe Röhm, and Bernhard Scholz. Corona: energy-efficient multi-query processing in wireless sensor networks. In *Database Systems for Advanced Applications*, pages 416–419. Springer, 2010.
- [104] Marie Kim, Jun Wook Lee, Yong Joon Lee, and Jae-Cheol Ryou. Cosmos: A middleware for integrated data processing over heterogeneous sensor networks. *ETRI journal*, 30(5):696–706, 2008.
- [105] Richard Kingston, Steve Carver, Andrew Evans, and Ian Turton. Web-based public participation geographical information systems: an aid to local environmental decision-making. *Computers, environment and urban systems*, 24(2):109–125, 2000.
- [106] Thomas H Kolbe. Representing and exchanging 3d city models with citygml. In *3D geo-information sciences*, pages 15–31. Springer, 2009.
- [107] Manolis Koubarakis. *Spatio-temporal databases: The CHOROCHRONOS approach*, volume 2520. Springer, 2003.
- [108] Thomas S. Kuhn. *La structure des révolutions scientifiques*. Flammarion, Paris, 1972.
- [109] P.A.K Kwaku. Questions-réponses : Sig traditionnels et participatifs. <http://ictupdate.cta.int/fr/Regulars/Q-R/Questions-Reponses-SIG-traditionnels-et-participatifs>. Page consultée le 29/11/2014.
- [110] Mei-Po Kwan. Interactive geovisualization of activity-travel patterns using three-dimensional geographical information systems: a methodological exploration with a large data set. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 8:185–203, 2000.
- [111] Mei-Po Kwan and Xiao-Dong Hong. Network-based constraints-oriented choice set formation using gis. *Geographical Systems*, 5:139–162, 1998.
- [112] Autodesk LandXplorer CityGML Viewer LandExplorer. Autodesk landexplorer citygml viewer home page. <http://autodesk-landexplorer-citygml-viewer.software.informer.com/>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [113] Olivier Le Deuff. Le succès du web 2.0: histoire, techniques et controverse. *Cersic-Erellif*, 2006.
- [114] José Antonio Coteló Lema, Luca Forlizzi, Ralf Hartmut Güting, Enrico Nardelli, and Markus Schneider. Algorithms for moving objects databases. *The Computer Journal*, 46:680–712, 2003.
- [115] Philip Levis and David Culler. Mat{é}: A tiny virtual machine for sensor networks. In *ACM Sigplan Notices*, volume 37, pages 85–95. ACM, 2002.

- [116] S Li, Y Ru, and Z Chang. Enhancing online public notices using gis to facilitate public participation in municipal developments.
- [117] Shuoqi Li, Sang H Son, and John A Stankovic. Event detection services using data service middleware in distributed sensor networks. In *Information Processing in Sensor Networks*, pages 502–517. Springer, 2003.
- [118] Songnian Li, Xincheng Guo, Xiaohong Ma, and Zheng Chang. Towards gis-enabled virtual public meeting space for public participation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(6):641–649, 2007.
- [119] Ting Liu and Margaret Martonosi. Impala: A middleware system for managing autonomic, parallel sensor systems. In *ACM SIGPLAN Notices*, volume 38, pages 107–118. ACM, 2003.
- [120] Hiba Maalaoui. Masterthesis: Modélisation et interrogation de données spatio-temporelles d’une zone urbaine 3d. Master’s thesis, Ecole Nationale d’Ingénieurs de Tunis, Tunisie, 5 2013.
- [121] Alan M MacEachren, Monica Wachowicz, Robert Edsall, Daniel Haug, and Raymon Masters. Constructing knowledge from multivariate spatiotemporal data: integrating geographical visualization with knowledge discovery in database methods. *International Journal of Geographical Information Science*, 13(4):311–334, 1999.
- [122] Samuel R Madden, Michael J Franklin, Joseph M Hellerstein, and Wei Hong. TinyDB: an acquisitional query processing system for sensor networks. *ACM Transactions on database systems (TODS)*, 30(1):122–173, 2005.
- [123] Gunnar Mein, Shankar Pal, Govinda Dhondu, Thulusalamatom Krishnamurthi Anand, Alexander Stojanovic, Mohsen Al-Ghosein, and Paul M Oeuvray. Simple object access protocol, September 24 2002. US Patent 6,457,066.
- [124] B. Mericskay and S. Roche. Cartographie et sig à l’ère du web 2.0 vers une nouvelle génération de sig participatifs. [http://sageo10.univ-toulouse.fr/IMG/pdf/S4A1\\_MERICSKAY.pdf](http://sageo10.univ-toulouse.fr/IMG/pdf/S4A1_MERICSKAY.pdf). Page consultée le 29/11/2014, 2010.
- [125] Boris Mericskay and Stéphane Roche. Cartographie et sig à l’ère du web 2.0: Vers une nouvelle génération de sig participatifs. In *Conférence internationale de Géomatique et Analyse Spatiale (SAGEO 2010), Toulouse: France*, 2010.
- [126] A. Mhedhbi. Référentiel technico-économique. Partie : cultures maraichères. CRDA de Kairouan, 2009.
- [127] Harvey J Miller. Measuring space-time accessibility benefits within transportation networks: basic theory and computational procedures. *Geographical analysis*, 31:1–26, 1999.
- [128] H.J. Miller. Modeling accessibility using space-time prism concepts within geographical information systems. *International Journal of Geographic Information Science*, 5:287–301, 1991.

- [129] Mandar Mokashi and A S Alvi. Data Management in Wireless Sensor Network: A Survey. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2(Issue 3):1380–1383, 2013.
- [130] Gabriel Montenegro, Nandakishore Kushalnagar, J Hui, and D Culler. Transmission of ipv6 packets over ieee 802.15. 4 networks. *Internet proposed standard RFC*, 4944, 2007.
- [131] Rene Mueller, Gustavo Alonso, and Donald Kossmann. Swissqm: Next generation data processing in sensor networks. In *CIDR*, volume 7, pages 1–9, 2007.
- [132] Michael D Myers and David Avison. Qualitative research in information systems. *Management Information Systems Quarterly*, 21:241–242, 1997.
- [133] Open Digital Rights Language ODRL. Open digital rights language home page. <http://www.w3.org/TR/odrl/>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [134] Open Geospatial Consortium OGC. Open geospatial consortium home page. <http://www.opengeospatial.org/>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [135] Open Geospatial Consortium OGC. Open geospatial consortium home page. <http://www.opengeospatial.org/>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [136] Open Geospatial Consortium OGC. Sensor web enablement. <http://www.opengeospatial.org/search/node/SWE/>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [137] Tim O’reilly. What is web 2.0: Design patterns and business models for the next generation of software. *Communications and Strategies*, 65(1):17–37, 2007.
- [138] Wanda J Orlikowski and Jack J Baroudi. Studying information technology in organizations: Research approaches and assumptions. *Information systems research*, 2(1):1–28, 1991.
- [139] David O’Sullivan, Alastair Morrison, and John Shearer. Using desktop gis for the investigation of accessibility by public transport: an isochrone approach. *International Journal of Geographical Information Science*, 14:85–104, 2000.
- [140] C. Parent, S. Spaccapietra, C. Renso, G.L Andrienko, N.V Andrienko, V. Bogorny, M. L. Damiani, A. Gkoulalas-Divanis, de Mado J. A. Fernandes, N. Pelekis, Y. Theodoridis, and Z. Yan. Semantic trajectories modeling and analysis. *ACM Comput. Surv*, 45:42, 2013.
- [141] N. Pelekis, B. Theodoulidis, I. Kopanakis, and Y. Theodoridis. Literature review of spatio-temporal database models. *The Knowledge Engineering Review Journal*, 19(3):235–274, 2005.
- [142] Nikos Pelekis, Yannis Theodoridis, Spyros Vosinakis, and Themis Panayiotopoulos. Hermes—a framework for location-based data management. In *Advances in Database Technology-EDBT 2006*, pages 1130–1134. Springer, 2006.
- [143] P. Penet. *L’hydraulique agricole dans la Tunisie méridionale*. Société anonyme de l’imprimerie rapide, Tunis, Tunisie, 1913.

- [144] Zhong-Ren Peng. Internet gis for public participation. *Environment and Planning B*, 28:889–906, 2001.
- [145] Jean Jacques Pérennes. *L'eau et les hommes au Maghreb: contribution à une politique de l'eau en Méditerranée*. KARTHALA Editions, 1993.
- [146] Jean Poitras and André Ladouceur. *Systèmes de gestion de conflits*. Cowansville, Québec: Éditions Y. Blais, 2004.
- [147] Darrell Addison Posey and Graham Dutfield. *Le marché mondial de la propriété intellectuelle: droits des communautés traditionnelles et indigènes*. IDRC, 1997.
- [148] PostGIS. Postgis home page. <http://Postgis.refractions.net/>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [149] PostgreSQL. Postgresql home page. <http://www.postgreSQL.org/>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [150] Vidyasagar Potdar, Atif Sharif, and Elizabeth Chang. Wireless sensor networks: A survey. In *Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2009. WAINA'09. International Conference on*, pages 636–641. IEEE, 2009.
- [151] R. Praing and M. Schneider. A Universal Abstract Model for Future Movements of Moving Objects. In *Proc of the 10th AGILE Int. Conf. on Geographic Information Science*, , pages 11–120. Springer, 2007.
- [152] Bastian Quilitz and Ulf Leser. *Querying distributed RDF data sources with SPARQL*. Springer, 2008.
- [153] UV Ramana and TV Prabhakar. Some experiments with the performance of lamp architecture. In *Computer and Information Technology, 2005. CIT 2005. The Fifth International Conference on*, pages 916–920. IEEE, 2005.
- [154] Paul Ramsey. The state of open source gis. <http://www.refractions.net/expertise/whitepapers/opensourcesurvey/survey-open-source-2007-12.pdf>. Page consultée le 29/11/2014.
- [155] Sonia Rathee and Amita Yadav. Survey on Spatio-Temporal Database and Data Models with relevant Features. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(Issue 1):1–5, 2013.
- [156] Martin Raubal. Representing concepts in time. In *Spatial Cognition VI. Learning, Reasoning, and Talking about Space*, pages 328–343. Springer, 2008.
- [157] Agnar Renolen. Modelling the real world: conceptual modelling in spatiotemporal information system design. *Transactions in GIS*, 4(1):23–42, 2000.
- [158] Stéphane Roche. *Les enjeux sociaux des systèmes d'information géographique*. Editions L'Harmattan, 2000.

- [159] John F Roddick and Myra Spiliopoulou. A bibliography of temporal, spatial and spatio-temporal data mining research. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 1(1):34–38, 1999.
- [160] Leila Ben Saad, Cedric Chauvenet, Bernard Tourancheau, et al. Heterogeneous ipv6 infrastructure for smart energy efficient building. In *SDEWES*, 2011.
- [161] M.A. Sakr and R.H. Güting. A New Approach for Spatiotemporal Pattern Queries in Trajectory Databases. In *11th Intl. Conference on Mobile Data Management*, pages 270–272, May 2010.
- [162] Asanka P Sayakkara, WSN Prabath Senanayake, Kasun Hewage, Nayanajith M Laxaman, and Kasun De Zoysa. The deployment of tikiridb for monitoring palm sap production. In *Real-World Wireless Sensor Networks*, pages 182–185. Springer, 2010.
- [163] Nigel Shadbolt, Wendy Hall, and Tim Berners-Lee. The semantic web revisited. *Intelligent Systems, IEEE*, 21:96–101, 2006.
- [164] Shashi Shekhar and Sanjay Chawla. *Spatial databases: a tour*, volume 2003. prentice hall Upper Saddle River, NJ, 2003.
- [165] Shashi Shekhar and Hui Xiong. Spatio-temporal data models. *Encyclopedia of GIS*, pages 1113–1113, 2008.
- [166] Chien-Chung Shen, Chavalit Srisathapornphat, and Chaiporn Jaikaeo. Sensor information networking architecture and applications. *Personal communications, IEEE*, 8(4):52–59, 2001.
- [167] Ana Simao, Paul J Densham, and Mordechay Haklay. Web-based gis for collaborative planning and public participation: An application to the strategic planning of wind farm sites. *Journal of Environmental Management*, 90:2027–2040, 2009.
- [168] Google SketchUp SketchUp. Google sketchup home page. <http://www.sketchup.com/>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [169] Chavalit Srisathapornphat, Chaiporn Jaikaeo, and Chien-Chung Shen. Sensor information networking architecture. In *Parallel Processing, 2000. Proceedings. 2000 International Workshops on*, pages 23–30. IEEE, 2000.
- [170] Steffen Staab, Rudi Studer, Hans-Peter Schmurr, and York Sure. Knowledge processes and ontologies. *IEEE Intelligent systems*, 16(1):26–34, 2001.
- [171] Rudi Studer, V Richard Benjamins, and Dieter Fensel. Knowledge engineering: principles and methods. *Data & knowledge engineering*, 25:161–197, 1998.
- [172] Bill Swartout, Ramesh Patil, Kevin Knight, and Tom Russ. Toward distributed use of large-scale ontologies. In *Proc. of the Tenth Workshop on Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Systems*, pages 138–148, 1996.
- [173] M. Thabti. Evaluation de l’irrigation traditionnelle sur puits de surface en zones arides du sud tunisien: Cas de la region de Médenine. Mémoire de cycle de spécialisation à l’INAT, 1997.

- [174] M. Thériault, C. Claramunt, A. M. Seguin, and P. Villeneuve. Temporal gis and statistical modelling of personal lifelines. In *9th Spatial Data Handling symposium*, pages 433–450. D. Richardson and P. van Oosterom (eds.), Springer-Verlag, 9-12 Juillet 2002.
- [175] P Thubert, A Brandt, T Clausen, J Hui, R Kelsey, P Levis, K Pister, R Struik, and J Vasseur. Rpl: Ipv6 routing protocol for low power and lossy networks. *IETF draft[online]*. <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-roll-rpl-19>, 2011.
- [176] TinyOS. Tinyos home page. <http://www.tinyos.net/>. Page consultée 29/11/2014, 2014.
- [177] Donia Triki, Ali Frihida, Henda Hajjami Ben Ghezala, and Christophe Claramunt. Modèle et langage pour la manipulation de trajectoires spatio-temporelles. *Revue Internationale Internationale de Géomatique*, 20(1):37–64, 2010.
- [178] Nicolas Tsiftes, Joakim Eriksson, Niclas Finne, Fredrik Österlind, Joel Höglund, and Adam Dunkels. A framework for low-power ipv6 routing simulation, experimentation, and evaluation. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 41:479–480, 2011.
- [179] Michael Uschold. Building ontologies: Towards a unified methodology. *TECHNICAL REPORT-UNIVERSITY OF EDINBURGH ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATIONS INSTITUTE AIAI TR*, 1996.
- [180] Michael Uschold and Martin King. *Towards a methodology for building ontologies*. Citeseer, 1995.
- [181] P Usher. Devolution of power in the northwest territories: Implications for wildlife. *Native People and Renewable Resource Management*, pages 69–80, 1986.
- [182] Erik de Vries. Rigorously relevant action research in information systems. *Sprouts: Working Papers in Information Systems*, 7(4), 2007.
- [183] Detlev Wagner, Mark Wewetzer, Jorgen Bogdahn, Nazmul Alam, Margitta Pries, and Volker Coors. Geometric-semantical consistency validation of citygml models. *Springer-Verlag, University of Applied Sciences, Germany*, 2012.
- [184] D. Wang and T. Cheng. A spatio-temporal data model for activity-based transport demand modelling. *International Journal of Geographic Information Science*, 15:561–585, 2001.
- [185] Trevor Wood-Harper. Research methods in information systems: using action research. *Research methods in information systems*, pages 169–191, 1985.
- [186] Michael F Worboys. A unified model for spatial and temporal information. *The Computer Journal*, 37(1):26–34, 1994.
- [187] Yi-Hwa Wu and Harvey J Miller. Computational tools for measuring space-time accessibility within dynamic flow transportation networks. *Journal of Transportation and Statistics*, 4:1–14, 2001.



- [188] Extensible Rights Markup Language XrML. Extensible rights markup language home page. <http://xml.coverpages.org/xrml.html>. Page consultée le 29/11/2014, 2014.
- [189] Jianqiu Xu and Ralf Hartmut Güting. A generic data model for moving objects. *Geoinformatica*, 17:125–172, 2013.
- [190] Yong Yao and Johannes Gehrke. The cougar approach to in-network query processing in sensor networks. *ACM Sigmod Record*, 31(3):9–18, 2002.
- [191] Yong Yao and Johannes Gehrke. Query Processing in Sensor Networks. In *CIDR*, pages 233–244, 2003.
- [192] May Yuan. Temporal gis and spatio-temporal modeling. In *Proceedings of Third International Conference Workshop on Integrating GIS and Environment Modeling, Santa Fe, NM*, 1996.
- [193] Jianfeng Zhao and David J Coleman. Geodf: Towards a sdi-based ppgis application for e-governance. In *Proceedings of the GSDI 9 Conference, Santiago, Chile*, <http://www.gsdi9.cl/english/papers/TS9.3paper.pdf>, 2006.
- [194] Donia Zheni, Ali Frihida, Henda Ben Ghezala, and Christophe Claramunt. A semantic approach for the modeling of trajectories in space and time. In *Advances in Conceptual Modeling-Challenging Perspectives*, pages 347–356. Springer, 2009.
- [195] Mounira Zouaghi. Masterthesis: Modélisation des connaissances ancestrales sur l’irrigation en tunisie en utilisant les langages du web sémantique. Master’s thesis, Ecole Nationale d’Ingénieurs de Tunis, Tunisie, 06 2013.